

EDİTÖR DOÇ. DR. HİLMİ ZENK

Makine Mühendisliği

Alanında

Uluslararası Güncel Yaklaşımlar

Haziran 2026

SERÜVEN
YAYINEVİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2026

ISBN • 978-625-8810-58-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR **DOÇ. DR. HİLMİ ZENK**

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KİRLENME AZALTMA STRATEJİLERİ VE GÜNEŞ PANELİ TEMİZLEME TEKNOLOJİLERİ: KAPSAMLI BİR LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	1
---	---

Abtullah TUĞCU

BÖLÜM 2

FİZİK BİLGİLİ YAPAY SİNİR AĞLARI (PINN) İLE BİRLEŞİK YÜKLEME ALTINDAKİ YAPISAL MALZEMELERİN MEKANİK ANALİZİ: ALÜMİNYUM 7075-T6 UYGULAMASI	27
---	----

Agah Aygahoğlu

BÖLÜM 3

SET ÜSTÜ OCAKLARINDA İŞİNİM VE TAŞINIMLA ISI GEÇİŞİNDE VERİM ARTIŞI VE TASARRUF İÇİN APARAT GELİŞTİRİLMESİ.....	43
--	----

Rabi Karaali

Enes Akçay

Arzu Keven

BÖLÜM 4

TEPSİLİ BİR KURUTUCUDA DEVECİ VE SANTA MARIA ARMUT DİLİMLERİNİN KURUTMA PERFORMANSLARI VE ENERJİ EKSERJİ ANALİZİ.....	67
---	----

Rabi KARAALİ

Arzu KEVEN

Canan CIMSIT

BÖLÜM 5

KURUTMA PROSESLERİ VE GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULARIN İNCELENMESİ.....	89
--	----

Dinçer Akal

BÖLÜM 6

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN LİTYUM-İYON BATARYALARIN ŞARJ STRATEJİLERİ	111
---	-----

Haluk Güneş

Mehmet Akif KUNT

BÖLÜM 7

ÇOKLU MİNİ KANALLI ISI DAĞITICILARIN ISI AKTARIM PERFORMANSI VE AKIŞ DÜZENLERİNİN İRDELENMESİ.....	129
---	-----

Koray KARABULUT

Yeliz ALNAK

BÖLÜM 8

DİJİTAL VERİ MERKEZİ GELİŞTİRİLMESİ İÇİN BIM TABANLI ENTEGRE PROJE YÖNETİMİ.....	155
---	-----

Zuhal OKTAY

Özlem ŞAHİN

Can COSKUN

BÖLÜM 9

KÂĞIT ÖZELLİKLERİ VE UYGULANAN TESTLER.....	175
---	-----

Zehra YILDIZ

Mehmet Gürsel KÖSE

BÖLÜM 10

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE NANO PARTİKÜL UYGULAMALARI.....	191
--	-----

Çiğdem ERSAN



FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE
KİRLENME AZALTMA
STRATEJİLERİ VE GÜNEŞ PANELİ
TEMİZLEME TEKNOLOJİLERİ:
KAPSAMLI BİR LİTERATÜR
İNCELEMESİ

“

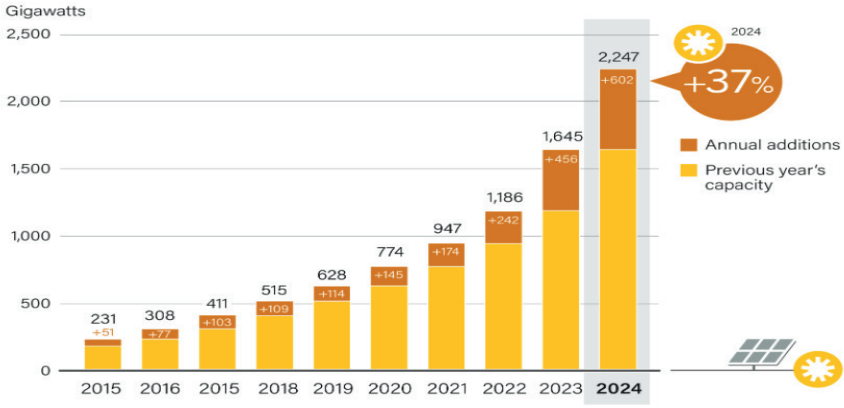
”

Abtullah TUĞCU¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye. abtullah.tugcu@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7911-4198

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerjiye doğru küresel geçiş, fotovoltaik (PV) sistemleri sürdürülebilir enerji çözümlerinin temel taşı olarak konumlandırmıştır. Temiz, güvenilir ve ölçeklenebilir enerji üretimi sunan PV sistemler, artan enerji taleplerini karşılamak ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çevre sorunları ve artan enerji talebi konusundaki farkındalığın artmasıyla birlikte, güneş enerjisi bu zorlukların üstesinden gelmek için umut verici bir çözüm sunmaktadır (Kaiss ve Hassan, 2024). Şekil 1’de 2015-2024 yıllarını kapsayan güneş enerjisi küresel kapasitesi ve yıllık artış miktarları görülmektedir.



Şekil 1. Küresel Güneş Enerjisi PV Kapasitesi ve Yıllık Artışlar (2015-2024), (REN21, 2025).

Şekil1’den görülebileceği gibi güneş enerjisi etkileyici bir hızla büyümeye devam ederken küresel kurulu güneş PV kapasitesi, 2023 ile 2024 yılları arasında 602 GW’lık (%37) rekor düzeyde bir artış oranıyla 2024 yılında 2,247 GW’a ulaşmıştır. Bu değer 2022 yılının toplamının neredeyse iki katı ve 2020 yılı öncesinde kurulu kapasitenin üç katından fazladır. Bu büyüme temel olarak güneş enerjisi kurulumlarının azalan maliyetlerine ve birçok ülkede yenilenebilir enerji destek politikalarının giderek daha fazla benimsenmesine bağlanmaktadır. Çin 2024 yılında da güneş PV sektöründe baskın güç olmaya devam etmiş, küresel bazda güneş enerjisi kapasite artışlarının yaklaşık %60’ını Çin oluştururken, %8’ini ABD, %5’ini Hindistan, %3’ünü Pakistan, %9’unu Almanya, Brezilya, İspanya, İtalya, Fransa ve Japonya, %15’ini dünyanın geri kalan ülkeleri oluşturmuştur. ((REN21, 2025, IEA PVPS, 2025, EM-BER ENERGY,2025).

Fotovoltaik güneş enerjisi çevreye herhangi bir sera gazı veya kirletici madde salmaz, bu da onu karbon ayak izini azaltmak ve küresel ısınma-

nın etkilerini önlemek için mükemmel bir seçim haline getirir (Masson ve ark. 2014). 2023 yılında küresel elektrik üretiminden kaynaklı CO₂ emisyon yoğunluğu, yenilenebilir enerji kaynakları payının rekor seviyeye ulaşmasıyla 2022 yılındaki 486 gCO₂/kWh değerinden %1,2 düşüşle 480 gCO₂/kWh değerine ulaşarak son yirmi yılın en düşük değerine gerilemiştir (EMBER ENERGY,2025).

Güneş enerjisi bol ve yaygın olup, artan enerji talebini karşılamak için bağımsız ve sürdürülebilir enerji kaynağı sağlamaktadır. Ancak tüm bu avantajlara rağmen güneş panellerinin verimliliği nem, rüzgâr hızı, yağış, sıcaklık, toz birikimi ve kuş pislikleri gibi çevresel ve atmosferik faktörlerden etkilenir. Güneş panelleri üzerinde toz oluşumu, fotovoltaiik hücrelere ulaşan güneş ışığı miktarını azaltarak panel verimliliği ve elektrik üretiminde önemli oranda düşüşe neden olur (Derakhshandeh ve ark. 2021, Darwish ve ark. 2015). Bu verimlilik azalması, öncelikle güneş ışınımının PV hücrelere ulaşmasının engellenmesinden kaynaklanır buda foton emiliminin ve dolayısıyla güç üretiminin azalmasına yol açar (Hooshyar ve ark. 2024, Ahmed ve ark. 2024). Ilse ve ark. çalışmalarında, toz birikimi, kuş pislikleri, yosun ve mantarlar, polen, motor egsozu ve tarımsal kirleticiler güneş panellerinin işlevselliğini olumsuz etkileyen nedenler olarak açıklamışlardır. Şekil 2’de güneş panelleri üzerindeki farklı kirlenme türleri görülmektedir (Ilse ve ark. 2019).



Şekil 2. Güneş panelleri üzerindeki farklı kirlenme türleri (Ilse ve ark. 2019).

Tozun güneş panelleri üzerindeki etkisini göstermek amacıyla yapılan pek çok deneysel çalışma endişe verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu çalışmalara göre, güneş panellerinin verimliliği toz birikimi nedeniyle %30 ila %40 oranında azalabilir ve bu da güç çıkışında %86’ya varan bir azalmaya yol açabilir (Gochhait ve ark. 2022). Bu performans düşüşü sadece enerji verimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda güneş enerjisi projelerinin ekonomik

değerlendirmesinde kritik bir ölçüt olan seviyelendirilmiş enerji maliyetini (LCOE) de artırır (Said ve ark. 2024).

Fotovoltaik sistemlerde, optimum performansı korumak için panellerin düzenli olarak temizlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Güneş modülü yüzeylerinde toz birikme oranı havadaki partikül konsantrasyonuna, aerodinamik partikül boyutlarının dağılımına, saha konumuna ve belirli hava koşullarına bağlıdır (Said ve Walwil 2014). Bu nedenle yerel çevre koşullarına göre uyarlanmış etkili güneş paneli temizleme yöntemlerinin geliştirilmesi son derece önemlidir. Ancak, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde kurulum maliyeti, su kullanımı ve tesislere erişim açısından zorluklar yaşanabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için sürekli olarak yenilikçi çözümler geliştirilmektedir. Güneş paneli temizliğini daha verimli, uygun maliyetli ve çevre dostu hale getirmek için otomatik temizleme sistemleri, kirlenme önleyici kaplamalar ve su tasarruflu temizleme yöntemleri gibi teknolojiler üzerinde çalışılmaktadır (Najmi ve Rachid, 2023). Literatürde incelenen bazı çalışmaların karşılaştırmalı bir analizi Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. *Toz azaltma stratejileri üzerine yapılan ilgili çalışmaların karşılaştırılması (Sepúlveda-Oviedo 2025).*

İlgili Çalışmalar	TY	EA	TS	M	BUY	ÇKKV
Jamil ve ark. (2017)	✓	×	×	×	✓	×
Gupta ve ark. (2019)	✓	×	×	×	×	×
Kazem ve ark. (2020)	✓	×	×	×	✓	×
Conceição ve ark. (2022)	✓	✓	×	×	✓	×
Aljaghoub ve ark. (2022)	✓	×	×	×	✓	✓
Quan ve ark. (2023)	✓	×	×	×	×	×
Najmi ve Rachid (2023)	✓	✓	×	×	✓	×
He ve ark. (2023)	✓	×	×	×	✓	×
Hassan ve ark. (2024)	✓	✓	×	×	✓	×
Chadly ve ark. (2024)	✓	×	×	×	✓	✓
Gandomzadeh ve ark. (2025)	✓	✓	✓	×	✓	✓
Sepúlveda-Oviedo (2025)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Kısaltmalar; TY: Temizlik Yöntemi, EA: Ekonomik Analiz, TS: Temizlik Sıklığı, M: Metodoloji, BUY: Bölgesel Uyum Yeteneği, ÇKKV: Çok Kriterli Karar Verme

Tablo 1 incelendiğinde, fotovoltaik sistemler için toz azaltma stratejileri üzerine yapılan çalışmaların toz davranışını etkileyen çeşitli temizleme teknolojilerini ve çevresel etkileşimleri kapsamlı bir şekilde incelendiği, bununla birlikte bu çalışmaların çoğunun bölgeye özgü kısıtlamalara uyarlanmış te-

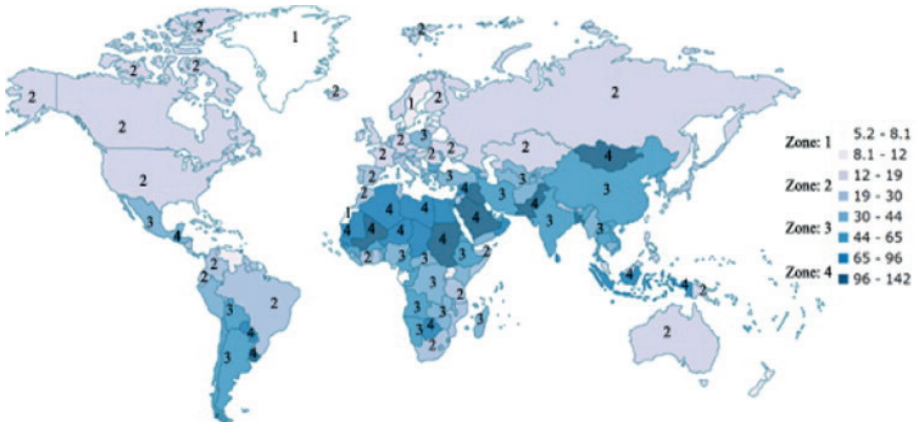
mizleme stratejilerinin seçimine rehberlik edecek yapılandırılmış metodolojiler sunmakta yetersiz kaldığı görülmektedir.

Sepúlveda-Oviedo yaptığı çalışmada, hem pasif hem de aktif yöntemleri analiz ederek PV temizleme yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Çalışma, ekonomik etkileri, çevresel kısıtlamaları ve sahaya özgü koşulları dikkate alarak sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmanın önemli bir katkısı da, iklimsel ve coğrafi faktörlerin bakım programlarını nasıl etkilediğini belirleyerek optimum temizleme sıklığının değerlendirilmesidir. Çalışmada ayrıca teknik performans, ekonomik fizibilite ve uzun vadeli sürdürülebilirlik temelinde temizleme yöntemlerini karşılaştırmak ve sıralamak için yapılandırılmış, çok kriterli bir karar verme çerçevesi sunan yeni bir Stratejik PV Temizleme Optimizasyon Yöntemi (SPV-COM) tanıtılmıştır (Sepúlveda-Oviedo, 2025).

Bu çalışma, literatür taraması yoluyla güneş panellerindeki toz birikimi, kir ve kuş pisliği gibi çevresel sorunların üstesinden gelmek için tasarlanmış ve geliştirilmiş temizleme sistemlerini incelemektedir. Aynı zamanda araştırmacılara, yatırımcılara ve temizlik operatörlerine karar verme noktasında ulaşmayı hedeflemekte gelecekteki benzer çalışmalara yardımcı olacağı umulmaktadır.

2. TOZ BİRİKİNTİLERİ VE ETKİLERİ

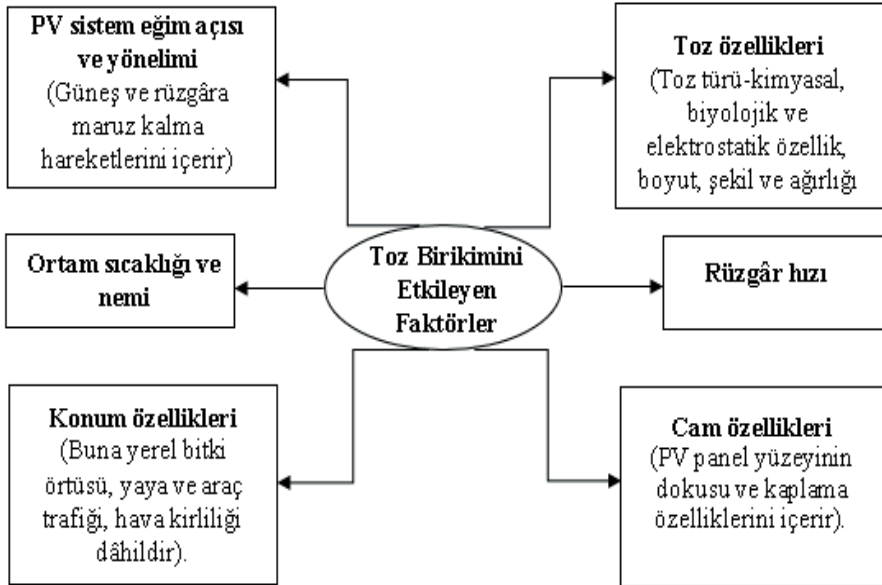
Toz parçacıklarının ve kirleticilerin konsantrasyonu, yerel koşullara bağlı olarak dünyanın farklı bölgelerinde aynı değildir. Toz konsantrasyonu ve iklim bölgelerinin özelliklerine göre toz yoğunluğunun sınıflandırılması Şekil 3'te haritalanmıştır. Haritadaki daha koyu renk daha yüksek bir PM_{10} konsantrasyonunu temsil eder, renk açıldıkça bu konsantrasyon azalır (Ghazi ve ark. 2014).



Şekil 3. Dünya PM_{10} konsantrasyonunu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ifade eden toz yoğunluğu (Ghazi ve ark. 2014).

Şekil 3’de görülen dünya genelindeki farklı bölgelerdeki atmosferik toz konsantrasyonu incelendiğinde MENA bölgesinin en yüksek konsantrasyona sahip olduğu görülmektedir. Çöl tozundan kaynaklı küresel tozun oluşumuna katkıda bulunan başlıca alanlar, Kuzey ve Güney Amerika, Orta Asya, Arap Yarımadası, Batı ve Doğu Çin, Avustralya ve Güney Afrika’dır (Tanaka ve Chiba, 2006, Longueville ve ark. 2010).

Güneş panelleri üzerindeki toz birikimi, çeşitli çevresel faktörlerden oluşan karmaşık bir olgudur. Bu unsurlar arasında, rüzgâr hareketi ve yönü, sıcaklık, güneş ışınımı, hava kirliliği, atmosferik basınç, toz fırtınaları, volkanik aktivite, kar ve nem bulunmaktadır. Bu parametrelerin her biri güneş panelleri üzerinde biriken toz miktarında önemli bir rol oynamaktadır (Mani ve Pillai 2010). Tozun doğası ile ilgili olarak, kum, kil, bakteri, karbon ve polen gibi çeşitli kaynakları da göz önünde bulundurmak önemlidir. Her toz türü, güneş panellerinin performansını etkileyen farklı özellikler sergileyebilir ve optimum verimliliği sağlamak için özel temizlik yaklaşımları gerektirir (Najmi ve Rachid, 2023). Aynı zamanda endüstriyel güneş panelleri için kaplama malzemesinin yüksekliği, kuraklık, eğim açısı, enlem ve boylam gibi coğrafi faktörler ve sahaya özgü parametreler toz birikme sürecini önemli ölçüde etkiler (Mani ve Pillai 2010). Sonuç olarak, belirli bir ülkede elde edilen araştırma bulgularının çeşitli coğrafi bölgelerde evrensel olarak uygulanabilir olmayabileceğini kabul etmek gerekir (Abdelsalam ve ark. 2021). Şekil 4’te toz birikimini etkileyen faktörler görülmektedir.



Şekil 4. Toz Birikimini Etkileyen Faktörler (Mani ve Pillai 2010).

Bilimsel çalışmalar, PV modüllerin verimliliğinin ve güç çıkışının toz birikimi nedeniyle önemli ölçüde azalabileceğini kanıtlamıştır. Fotovoltaik sistemlerin performansı çevresel koşullara karşı oldukça hassastır. Toz birikimi, nem ve sıcaklık dalgalanmaları gibi temel faktörler, verimlilik düşüşünün başlıca nedenleri arasındadır. Toz miktarının ötesinde, son çalışmalar toz bileşiminin performans kayıplarında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır (Sepúlveda-Oviedo (2025).

Tejwani ve Solanki yaptıkları çalışmayla, bir güneş panelinin 30 gün boyunca kirli kalması durumunda, panellerin enerji çıkışının %50 oranında düşebileceğini belirtmişlerdir (Tejwani ve Solanki, 2010). Kurokawa çalışmasında, toz birikimi nedeniyle güneş panellerinin toplam enerjisinin %15'ini günlük olarak kaybedebileceğini belirtmiştir (Kurokawa,2012). Mondal ve Bansal yaptıkları çalışma ile panellerin güç çıkışındaki toplam kirlenme kaybının %56'sının toz birikiminden kaynaklandığını göstermiştir. (Mondal ve Bansal, 2015). Diğer araştırmacılar tarafından yapılan nispeten yeni çalışmalarda da toz birikiminin güneş panellerinin verimliliğini yaklaşık %20'ye kadar azaltabileceğini doğrulamaktadır.

Yakubu ve ark. farklı bölgeler için yaptıkları vaka çalışmalarında, endüstriyel kömür tozu nedeniyle %64'e varan, ince kum nedeniyle %32'ye varan ve alçı parçacıkları nedeniyle yaklaşık %30'a varan verimlilik düşüşleri bildirmekte ve yerel toz karakterizasyonunun gerekliliğini vurgulamaktadır (Yakubu ve ark.2025). Dahası, dolu fırtınası, kum fırtınası ve uzun süreli nem maruziyeti gibi çevresel stres faktörleri, PV modülünün bozulmasını daha da hızlandırarak, özel olarak tasarlanmış azaltma stratejilerinin gerekliliğini pekiştirmektedir (Chanchangi ve ark.2021).

3. FOTOVOLTAİK PANEL TOZUNUN TEMİZLENMESİNE YÖNELİK AZALTMA STRATEJİLERİ

Mevcut literatürde, toz birikiminin ciddi bir endişe kaynağı olduğu buna bağlı olarak önemli ölçüde elektriksel ve ekonomik kayıplara yol açtığı açıkça vurgulamakta olup, güneş paneli temizliği konusunun giderek artan bir ilgi gördüğü vurgulanmaktadır. PV panellerin elektriksel performansını etkileyen pek çok parametre mevcuttur. Bu parametreler toz türü ve bileşimi, panel yüzeyindeki toz yüklemeye yoğunluğu, sıcaklık, nem rüzgâr hızı gibi çevresel koşullar, panel yönü ve eğimi, temizlik yöntemi, sıklığı ve süresi şeklinde sıralanabilir (Akkoyunlu ve Abdallatif, 2024).

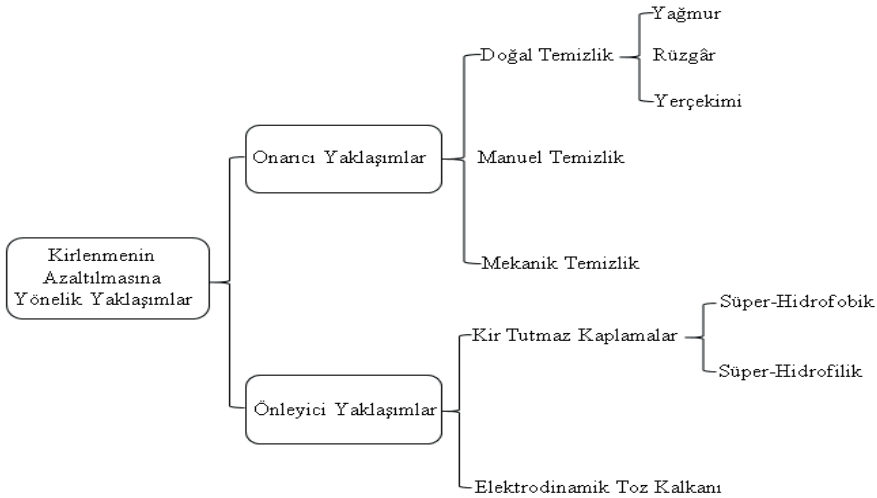
Fotovoltaik modül yüzeylerinde toz birikmesi, ışık geçirgenliğini önemli ölçüde azaltan, modül sıcaklığını yükselten ve genel sistem verimliliğini büyük ölçüde düşüren bir işletme sorunudur. Bu sorunu çözmek için, doğal, manuel, otomatik, önleyici ve elektrodinamik temizleme yöntemleri olarak çok çeşitli toz giderme teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler, iklim koşullarına, kuru-

lum ölçeğine, kaynak mevcudiyetine ve ekonomik kısıtlamalara bağlı olarak farklı avantajlara ve sınırlamalara sahiptir (Maghami, 2026).

Güneş enerjisi santrallerinin performansını ve güvenilirliğini optimize ederek sürekli kullanımını sağlamak için bu santralleri uygun şekilde yönetilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu sayede güneş panellerinin verimliliği ve istikrarı artırılırken maliyetler azaltılabilir (Hopke ve Hestres, 2017).

Güneş panellerinin temizlenmesi, güneş enerjisi geliştiricileri için en büyük zorluklardan biridir, çünkü güneş paneli yüzeyinin temizlenmesi dikkatli bir planlama ve zaman, malzeme ve iş gücü gibi farklı kaynaklar gerektirir bu da üretim maliyetlerini artırır. Güneş panellerinin temizlenmesi, bir güneş enerjisi santralının uzun vadeli operasyonel ve finansal başarısını sağlamak için önemli bir görevdir (Jamil ve ark. 2017).

Temizleme yönteminin seçimi maliyet, coğrafi konum, ekipman verimliliği ve kaynak bulunabilirliği gibi birden fazla faktöre bağlıdır (Aljaghoub ve ark. 2022). PV modüllerde biriken toz parçacıklarının kimyasal özellikleri, renk bozulması, korozyon ve aşınmaya yol açabileceğinden modüllerdeki enerji üretiminde azalmaya ve kullanım ömürlerinin kısalmasına neden olabilir. Bu nedenle, kirlenmenin etkisini en aza indirmek için kirlenmiş PV yüzeylerin etkili bir şekilde temizlenmesi son derece önemlidir. Bu sorunu ele almak için geliştirilen stratejiler, onarıcı ve önleyici yaklaşımlar olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Şekil 5'te kirlenmenin azaltılmasına yönelik yaklaşımlar arasında doğal temizleme, manuel temizleme, mekanik temizleme gibi onarıcı yaklaşımlar, kir tutmaz yüzey kaplamaları ve elektrodinamik toz kalkanı gibi önleyici yaklaşımlar görülmektedir (Alsharef, 2023).



Şekil 5. Kirlenmenin azaltılmasına yönelik yaklaşımlar (Alsharef, 2023).

3.1 KİRLENMEYİ GİDERMEYE YÖNELİK ONARICI YAKLAŞIMLAR

3.1.1 Doğal Temizlik

Doğal temizlik, en kolay PV temizleme tekniği olarak kabul edilir, bu yöntemde PV'yi temizlemek için yağmur, rüzgâr ve yerçekimi gibi doğal unsurlar kullanılır (Alsharef, 2023). Geleneksel olarak, yüksek hızla hareket eden rüzgâr, PV'yi biriken tozdan temizlemek için etkili bir yöntemdir, aynı zamanda bağıl nemi de azaltır (Jiang ve ark. 2018, Tanesab ve ark. 2016). Düzenli yağış alan ve modül açılarının yeterince eğimli olduğu bölgelerde, yağmur suyu modül yüzeylerindeki kir ve birikintilerin çoğunu etkili bir şekilde temizleyebilir ancak yosunların temizlenmesi için uygun bir temizlik gerektirir. Bu yöntem, temizlik maliyeti oluşturmaz, şiddetli kirlilik ve yetersiz yağış durumunda güvenilir değildir (Mekhilef ve ark., 2012, Marethe ve Patil, 2020). Yerçekimi, toz parçacıklarının kaymasını kolaylaştırarak PV panellerin kendi kendini temizleme özelliklerini etkiler. Bu etki, öncelikle panellerin eğim açısı tarafından belirlenir. Literatürdeki çalışmalar, hem temizleme verimliliğini hem de enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak için optimum eğim açılarının seçilmesinin önemini vurgulamaktadır (Patil ve ark. 2018). Panellerin kendi kendini temizleme özelliklerini artırmak ve enerji performansını korumak için bölgeye özgü eğim açıları kullanmak gibi optimizasyon stratejilerinin yanında mevsimsel değişimlere bağlı olarak eğim açısının periyodik olarak ayarlanması, sistem verimliliğini daha da artırabilir (Cano ve ark, 2014). Şekil 6'da iki doğal temizleme yöntemi görülmektedir.



Şekil 6. Fotovoltaik modülün doğal temizleme yöntemleri (Reset solar temizleme, 2026).

3.1.2 Manuel Temizlik

Manuel temizlik, PV panelleri etkili bir şekilde temizlemek için uzatma direkleri, fırçalar, su, hortum ve bez gibi temel temizlik araçlarının kullanıldığı, yüksek işçilik maliyeti ve büyük miktarda su gerektiren nispeten ilkel bir teknolojidir (Chanchangi ve ark. 2021). Fotovoltaik panel performansının optimum seviyede tutulması için genellikle düzenli müdahaleler gerektirir.

Bu yöntem, yüksek maliyetler, hareket zorlukları, insan yaralanması riski, düzensiz temizlik, yetersiz bakım, PV panel hasarı ve düşük temizleme verimliliği nedeniyle etkili değildir; ayrıca büyük güneş enerjisi santrallerinde bulunan geniş PV yüzeylerinin temizlenmesi için önemli bir zaman ve çaba gerektirir. Dahası, panellerin yüzeyini önemli ölçüde etkileyebilecek sert kimyasallar ve jeller de dahil olmak üzere çeşitli temizlik maddelerinin kullanımını gerektirebilir (Hudedmani ve ark. 2017). MENA bölgesi gibi yüksek toz konsantrasyonuna sahip sahalarda, megawatt seviyesindeki büyük ölçekli PV güç tesislerinin temizlenmesi için su tüketimi yaklaşık $0,5 \text{ L/m}^2$ olarak tahmin edilmektedir (Nomeir ve ark. 2023). Manuel temizlik yöntemi, daha fazla insan gücü, uzun temizlik süreleri ve panellerin çok yönlü bir şekilde ele alınmasını gerektirmektedir (Zahedi ve ark. 2021). Bu yöntem, küçük ölçekli PV sistemler için veya otomatik temizleme sistemlerinin olmadığı durumlarda tamamlayıcı bir yaklaşım olarak önerilmektedir (Ju ve Fu, 2021). Şekil 7’de manuel temizlik yöntemine ait görsel görülmektedir.



Şekil 7. Manuel temizleme yöntemi (Kazem ve ark. 2020).

3.1.3 Mekanik Temizlik

PV modül yüzeylerinin temizlenmesi için silme, titreşim, üfleme, dronlar veya robotlar tarafından fırçalama gibi çeşitli mekanik ve otomatik yöntemler kullanılmaktadır. Bu işlemler daha az manuel iş gücü gerektirir ve otomasyon sistemlerinden yararlanır (Alsharef, 2023).

Şekil 8’de görüldüğü gibi bir traktöre monte edilmiş hidrolik bir kolun fırça ile donatıldığı sistem, güneş panellerinin temizlenmesi için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu sistem, güneş panellerini temizlemek için tasarlanmış, kullanımı kolay, kompakt ve düşük su tüketimine sahip su jeti nozullarıyla donatılmıştır. Fotovoltaik modül sıraları arasında hareket ederek güneş panellerini etkin bir şekilde temizler. Temizlik sırasında panellerin hasar görmesini önlemek için fırça, basınç kontrol sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem, fırçanın panellerle temas ettiği kuvveti sensörler yardımıyla düzenleyerek çi-

zik ve hasar riski olmadan nazik bir temizlik sağlar (Najmi ve Rachid, 2023, ISRAR,2026).



Şekil 8. Traktöre monte edilmiş fırçalı temizlik yöntemi (ISRAR,2026)

Şekil 9’da yüksek basınçlı su jetleri ve kontrollü su püskürtme sistemi görülmektedir. Bu yöntem, gerekli yüksek basıncı elde etmek için büyük miktarda su ve pompa kullanımını gerektirir. Bu yöntem, hücre çalışma sıcaklığını düşürürken panel kirliliğini giderir ve modül performansını iyileştirir. Yöntemin dezavantajı, suyun kıt olduğu bölgelerde kullanımının zorluğudur. Ayrıca, PV kenarlarında kimyasal birikmeye neden olma olasılığının yanı sıra büyük miktarda su kaybına da neden olur. Yüksek basınçlı su pompalarının kullanılması, PV tarafından üretilen gücün bir kısmının tüketilmesi anlamına gelir, bu da verimliliğin azalması demektir; ayrıca su borularının tıkanması veya kırılması riski ve suyun düşmesiyle sıcak PV’nin termal şoka uğrama olasılığı da vardır (Kazem ve ark. 2020).



Şekil 9. Yüksek Basınçlı Su Jeti (Derakhshandeh ve ark. 2021).

Yüksek basınçlı su püskürtme sistemleri kullanan temizleme sistemlerinin, yansıma oranının %95'ine kadarını geri kazanabildiğini ve fotovoltaiik verimliliğinde önemli iyileştirmeler sağlayabildiğini göstermiştir (Derakhs-handeh ark. 2021). Etkili olmalarına rağmen, bu sistemler önemli miktarda su kullanımı ve enerji girdisi gerektirir ve kaynakların kıt olduğu bölgelerde zorluklar yaratır. Bununla birlikte, optimizasyon çalışmaları, otomatik ve hassas bir şekilde kontrol edilen su jeti sistemleri kullanılarak işletme maliyetlerinin azaltılmasında umut vaat etmektedir (Cattani ark. 2021).

Son yıllarda otomatik PV temizliği için çeşitli ticari çözümler geliştirilmiştir. Şekil 10 A'da, dikey bir fırçayı yatay olarak bir panel sırası üzerinde hareket ettirerek PV panelleri temizleyen güneş paneli temizleme robotu görülmektedir. "Wash Panel" isimli İtalyan bir şirketin ürettiği, 1 ila 16 metre uzunluğunda ve 12V pil içeren bu temizleme robotu otomatik olarak devreye alınabiliyor. Aynı zamanda, robota temizlik esnasında panelleri ıslatmak için bir su hortumu da takılı. Wash Panel'in temizleme sistemi tamamen otonom olup, yağmur sensörü ve su jetleri kullanılarak çift programlanabilir bir çalışma prensibine sahiptir. Sürekli ve homojen bir temizlik sağlar. Bu sistem modülerdir ve uzaktan denetim ve yönetim olanağı da sunar. Herhangi bir ek çerçeve, destek ve ek kılavuz gerektirmez. Yer sistemlerine, binalara, eğimli çatılara veya sundurma çatılara monte edilebilir (WASH PANEL, 2026).



A) Wash Panel



B) pvCLEAN MASTER



C) GEKKO solar PREMIUM



D) NOMADD

Şekil 10. Robotik Temizleme (WASH PANEL, 2026 ve SERBOT, 2026, NOMADD, 2026)

Ayrıca, Şekil 10 B ve C' de görüldüğü üzere güneş fotovoltaik panellerine mobil olarak yerleştirilmek üzere Serbot Swiss Innovations şirketi tarafından geliştirilen pvClean MASTER ve Gekko Solar PREMIUM gibi robotik temizleme mekanizmaları da mevcuttur. pvClean MASTER'ın verimliliği saatte maksimum 1440 m²'ye, ortalama ise 600 m²'ye kadar temizleme kapasitesine sahiptir. Temizleme işlemi, dönen bir fırçalar kullanılarak, panellere sürekli basınç uygulayarak ve deminealize su kullanarak gerçekleştirilir. 20°-25° kurulum açısı aralığına sahip güneş enerjisi sistemleri için son derece verimli kompakt ve modüler bir sistem olup bir yerden başka bir yere kolayca taşınabilir. Operatör, robotu rahatça kaldıracaktır ve uzaktan kumanda kullanarak kontrol eder. 50 m uzunluğunda bir besleme hortumu üzerinden bir destek arabasından beslenir (SERBOT, 2026).

Gekko Solar PREMIUM, özellikle ulaşılması zor olan çatı üstlerindeki ve güneş enerjisi santrallerindeki fotovoltaik panelleri temizlemek için tasarlanmıştır. Kompakt ve çok yönlüdür ve kolayca bir yerden diğerine taşınabilir. Robotun temizleme verimliliği saatte maksimum 1.040 m²'ye, ortalama temizleme verimliliği ise saatte 670 m²'ye kadar ulaşmaktadır. Temizleme işlemi pvClean MASTER'a benzer şekilde olup operatör, robotu bir joystick kullanarak radyo üzerinden kontrol eder. Gekko Solar PREMIUM, 45°'ye kadar eğimde kullanılabilir (SERBOT, 2026).

Şekil 10 D'de NOMADD Pte. Ltd. şirketi tarafından geliştirilen, su kullanmayan mekanik otomatik toz alma cihazı görülmektedir. Cihaz, dünyanın en zorlu çöl koşullarında (MENA Çöl Bölgesi'nde) güneş panellerine zarar vermeden en yüksek performansı koruma konusunda benzersiz bir çözüm sunar, her türlü çöl iklimi için sadelik, dayanıklılık, direnç ve güvenilirliğe odaklanarak geliştirilmiştir. Minimum hareketli parça ve benzersiz patentli açılı fırça tasarımıyla, herhangi bir güneş paneli dizisinde 25 yıl boyunca çalışacak şekilde tasarlanmıştır. NOMADD, dizi boyutundan bağımsız olarak, tüm diziyi bir günden kısa sürede, hızlı ve susuz şekilde tamamen otomatik bir güneş enerjisi temizleme sistemidir. NOMADD, çöl koşullarındaki güneş panellerinin verimlilikle ilgili belirsizliklerini azaltarak ve toz fırtınalarından sonra günlük temizlikte dizideki tozun %99,6'ını ortadan kaldırır (NOMADD, 2026).

Drone'lar, kontrol edilmesi kolay, veri kaydında verimli, inceleme ve izlemde güvenilir sabit veya manuel temizleme yöntemlerine tercih edilen, PV alanında yeni bir teknolojidir. Drone'ların sınırlı uçuş süresi ve şarj süresi gibi bazı sınırlamaları vardır; bunlar temizleme döngülerinin optimize edilmesi ve güç kaynağının özelleştirilmesiyle azaltılabilir. PV temizliği için dron kullanmanın, hareketlilik, özerklik ve panelleri ihtiyaç duyulduğu anda temizleme yeteneği gibi belirgin avantajları vardır; böylece sabit robotik yaklaşımlarla ilişkili yüksek maliyetlerden kaçınılır. Büyük ölçekli PV tesislerin

temizlenmesi için çeşitli ticari drone'lar mevcuttur. (Gallardo-Saavedra ve ark. 2018, Al-Housani ve ark. 2019).



Şekil 11. Hercules 20 Sprey drone (DRONE VOLT, 2026).

Şekil 11’de Drone Volt tarafından geliştirilen düşük basınçlı püskürtme çözümü sunan Hercules 20 Sprey dronu görülmektedir. Hercules 20 Sprey dronu, 3 veya 4 nozullu bir püskürtme aparatı ile donatılmıştır. Karbon fiber gövdesi ve eloksallı alüminyum bağlantı parçaları, Hercules 20’yi son derece dayanıklı kılar. 4 adet çıkarılabilir kolu, iniş takımı ve taşıma kapasitesi sayesinde Hercules 20’nin taşınması kolaydır. Motorlu pompa sistemi sayesinde Hercules 20 dronu, 50 m uzunluğunda bir besleme hortumuyla dakikada 18 litreye kadar sıvı püskürterek manuel püskürtmeye kıyasla daha hızlı ve daha etkili bir uygulama sağlar. Hercules 20 Sprey dronu güneş paneli temizliğinin yanı sıra çatı ve yüzey temizliklerini de etkin bir şekilde gerçekleştirebilmektedir (DRONE VOLT, 2026). Günümüzde, güneş panellerinin temizliği için drone kullanımı hala geliştirme aşamasındadır.

3.2 Kirlenmeyi Gidermeye Yönelik Önleyici Yaklaşımlar

3.2.1 Kir Tutmaz Kaplamalar

Kaplamalı yüzeyler, fotovoltaik panellerin bakımı ve optimizasyonunda kritik bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Hidrofobik, hidrofilik ve yeni ortaya çıkan gelişmiş teknolojiler gibi özel kaplamalar kullanılarak, bu çözümler toz yapışmasını önlemeyi, doğal temizleme süreçlerini iyileştirmeyi ve Şekil 12’de görüldüğü gibi kirlenmeye bağlı verimlilik kayıplarını azaltmayı amaçlamaktadır. Kaplamalar çevresel unsurlarla etkileşime girecek şekilde tasarlanmıştır ve panel yüzeylerinin temiz ve yüksek performansı korumak için su ve ışıktan faydalanır. Hidrofobik ve hidrofilik gibi bazı yenilikçi malzemeler, son yıllarda PV modüllerinde toz birikimini azaltmak için giderek daha popüler hale gelmiştir (Sepúlveda-Oviedo, 2025).



Şekil 12. *Hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerdeki su damlalarının karşılaştırılması (Sepúlveda-Oviedo, 2025)*

SiO_2 ve TiO_2 nanopartikülleri içeren hidrofobik kaplamalar, sadece su iticilik performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek optik şeffaflık sayesinde ışık geçirgenliğini maksimum düzeyde tutar (Ekren ve ark. 2022).

Aljdaeh ve ark. yaptıkları çalışmada, hidrofobik kaplamaların, toz yapışmasını azaltmada ve fotovoltaik panellerin kendi kendini temizleme özelliklerini artırmada hayati bir rol oynadığını, su itme özelliğiyle karakterize edilen bu kaplamaların, su damlacıklarının zahmetsizce akmasını sağlayarak toz parçacıklarını uzaklaştırdığını ve kirlenme kayıplarını etkili bir şekilde azaltacağını vurgulamaktadırlar. Çalışma, yüksek toz birikimine bağlı olarak PV modüllerde üretilen gücün azaldığının tespit edildiği yarı kurak bir coğrafi bölgede fotovoltaik polikristalin Si güneş pili modülleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplamalı panellerin, düzenli yüzey temizliği yapılmasa bile %13 daha fazla çıkış gücü ürettiği bulunmuştur. Ayrıca, kaplamalı panellerin, kaplamasız panellere göre %50 daha az su tükettiği tespit edilmiştir (Aljdaeh ve ark. 2021).

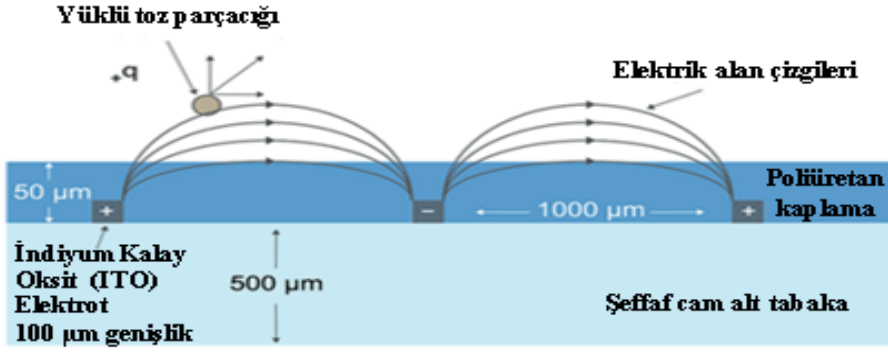
Fathi ve ark. yaptıkları çalışmada, fotovoltaik panellerde tozlu ortamın neden olduğu güvenilirlik ve verimlilik sorunlarını, hidrofobik nanokaplama uygulamasıyla incelemişlerdir. Çalışmalarında, optik ve termoelektrik test sonuçlarının nanokaplamalı fotovoltaik panellerde ışık geçirgenliğinde ve açık devre voltajında artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca, voltaj kayıpları ile sıcaklık arasındaki deneysel olarak elde edilen değerlerin, kendi kendini temizleyen nanokaplamalı fotovoltaik modüllerin MENA bölgesinin sıcak ikliminde daha iyi performans göstereceğini belirtmektedirler. Bu sonuçla, nanokaplamalı fotovoltaik enerji üretiminin, MENA bölgesinin yüksek sıcaklıklara

sahip bölgeleri için çok faydalı olacağını ve büyük ölçekli nanokaplamalı fotovoltaik santrallerin kurulabileceğini öngörmektedirler. Bunula birlikte çalışmada, hidrofobik kaplamaların ekonomik avantajları da dikkate değerdir. Manuel temizleme sıklığını en aza indirerek, işletme ve bakım maliyetlerinin de önemli ölçüde azalacağı belirtilmektedir. Karşılaştırmalı analizler, hidrofobik kaplamaların, kaplamasız PV sistemlerine kıyasla temizlikle ilgili su tüketimini ve işletme maliyetlerini yıllık yaklaşık %16 oranında azalttığını ortaya koymuştur (Fathi ve ark. 2017). Bu avantajlarına rağmen, hidrofobik kaplamalar mekanik aşınma, ultraviyole (UV) bozulması ve zorlu çevre koşullarına maruz kalmalarından dolayı kullanım ömürleri olumsuz yönde etkilenir (Sepúlveda-Oviedo, 2025).

Hidrofilik kaplamalar, su çekme özelliklerinden yararlanarak fotovoltaik panellerin kendi kendini temizleme verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar. Bu kaplamalar, suyun panel yüzeyine eşit şekilde yayılmasını sağlayarak toz parçacıklarını etkili bir şekilde gevşetir ve uzaklaştırır. Özellikle TiO_2 ve diğer nanomalzemeleri içeren bu tür kaplamaların mekanizmaları ve uygulamaları literatürde geniş çaplı olarak incelenmiş ve çalışmalar, süperhidrofilik kaplamaların, su filmi oluşumunu teşvik ederek toz birikimini önemli ölçüde azalttığını ve böylece yağmur veya temizleme işlemleri sırasında yapışmış parçacıkların uzaklaştırılmasını kolaylaştırdığını göstermektedir. Çalışmalar, bu yöntemin toz birikimini azalttığını ancak PV verimliliğini tamamen geri kazandırmadığını göstermektedir (Cao ve ark. 2022).

3.2.2 Elektrodinamik Toz Kalkanı

Elektrodinamik ekran olarak da bilinen elektrodinamik toz kalkanı (EDS), dinamik bir elektrik alanı oluşturarak toz parçacıklarını PV yüzeyinden uzaklaştırabilen veya taşıyabilen, gelecek vaat eden bir kirlenme önleme tekniğidir (Son ve ark. 2012, Guo ve Javed, 2018). Şekil 13’de görüldüğü gibi spesifik olarak, bir alt tabaka üzerindeki paralel elektrotlara alternatif yüksek gerilimler uygulanarak dinamik elektrik alanı tarafından elektrodinamik hareketli dalgalar üretilir. Elektrik yüklü toz parçacıkları daha sonra Coulomb kuvveti tarafından yüzeyden kaldırılır ve elektrodinamik yürüyen dalgalar aracılığıyla EDS’nin kenarına taşınır (Kawamoto ve Guo, 2018, Sarver ve ark. 2013). EDS ile PV temizliği otomatik ve sürekli olarak yapılabilir. EDS kullanılarak yapılan temizlik, su ve insan gücü tasarrufu sağladığı ve çevre dostu olduğu için etkili bir temizlik yöntemi olarak kabul edilmektedir (Mazumder ve ark. 2011, Kawamoto ve Shibata 2015).



Şekil 13. Bir EDS'nin kesitsel şematik diyagramı (Mazumder ve ark. 2011)

Pavan ve ark tarafından yapılan çalışmada, fotovoltaik (PV) panellerden tozu temizlemek için elektrikli bir dinamik sistemin kullanılmasının etkinliğini incelemiştir. Çalışmada, PV yüzeyinde biriken toz kütlelerinin yüzeyi nasıl etkilediğini değerlendirmiş ve sistemin elektrotlarının kademeli olarak devreye sokulmasının toz parçacıklarının statik olarak yüklenmesine neden olduğunu, bunun da alternatif bir elektrik alanı kullanılarak tozun temizlenmesini kolaylaştırdığını ortaya koymuştur. Bu yöntemde, EDS'nin iki dakika içinde panellerdeki toz birikiminin %90'ını giderdiği, güç üretiminin de EDS temizliğinden sonra orijinal gücünün %98'ine geri döndüğü tespit edilmiştir (Pavan ve ark. 2011).

EDS yöntemi ile panel temizlemedeki zorluklar arasında yağmur sonrası tozlu güneş panellerinin temizlenmesi, ince tozun giderilmesi ve operatörlerin güvenliği sayılabilir. Tozlu bir güneş paneline yağın yağmur, yağış miktarı az olduğunda çamur izlerinin oluşmasına neden olabilir. Çamur güneş paneline yapışır ve temizlenmesi için bir miktar güç gerektirebilir. Böyle bir durumda, EDS sistemi ancak çamur kuruduktan sonra etkili olabilir (Kawamoto ve Shibata 2015). Ayrıca, EDS sistemleri tozu giderebilmekte ve tozlu güneş panellerini iyi duruma getirebilmekte olsa da, bu teknoloji yüzeyde bulunan ince tozu gidermez. Katar'da yapılan bir çalışmada, EDS temizliğinden sonra diğer toz parçacıkları giderilirken, 20 mm'den küçük toz parçacıklarının kalıcı olduğu tespit edilmiştir (Guo ve Javed, 2018). Ayrıca, düşük toz birikim seviyelerinde EDS'nin verimliliğinin azaldığı da belirtilmiştir. 100 mg/m² ve 200 mg/m² toz yükünde EDS'nin verimliliğinin sırasıyla %90 ve %60 olduğu kaydedilmiştir. EDS ekranları güneş paneli ile çalıştırıldığından, PV santralının nihai güç çıkışının %15'e kadar azaldığı tespit edilmiştir. EDS ile temizlik yapılırken, ultraviyole ışınları nedeniyle PV ekranının bozulma riski de bulunmaktadır. EDS'nin çalışması için yüksek voltaj gereklidir ve bu durum operatörler için bir güvenlik tehlikesi oluşturabilir (Deb ve Brahmabhatt, 2018).

Yapılan literatür incelemesinde, sistemin düşük maliyetli olduğu, daha az güç tükettiği ve su kullanmadığı için özellikle kurak ve çöl iklimi bulunan bölgelerdeki büyük kapasiteli PV santrallerde kullanımını uygun hale getirmektedir. Tablo 2’de yukarıda bahsedilen kirlenmeyi azaltmaya yönelik onarıcı ve önleyici yaklaşımlarının avantaj ve dezavantajları özetlemiştir.

Tablo 2. Fotovoltaik modüller için kirlenmeyi azaltma yaklaşımlarının karşılaştırılması (Song ve ark. 2021).

Kirlenmeyi Azaltma Yaklaşımları	Avantajlar	Dezavantajlar
Doğal temizlik	• Ücretsiz	• Coğrafi çevreye ve hava koşullarına bağlıdır. • Küçük boyutlu toz parçacıkları için etkisizdir.
Manuel temizlik	• Neredeyse %100 kir giderme verimliliği. • Düşük sermaye maliyeti.	• Yüksek işçilik maliyeti. • Su kıtlığı olan bölgeler için uygun değildir. • Yüzey aşındırıcı hasar.
Mekanik temizlik	• %95 kir giderme verimliliği (tam otomatik). • Elektromekanik kontrolör ile temizliğin otomatik olarak etkinleştirilmesi. • Düşük veya hiç işçilik maliyeti yok. • Yüzey sıcaklığının azaltılması.	• Yüksek başlangıç maliyeti. • Yüksek işletme ve bakım maliyetleri. • Yüzey aşındırıcı hasarı.
Kirlenmeyi önleyici kaplama	• Pasif kirlenmeyi azaltma yaklaşımı. • Dışarıdan iş gücüne ve diğer kaynaklara gerek yok. • Temizlemeler arasındaki sürelerin uzatılması.	• PV verimliliğinin azaltılması. • Temizliğe olan ihtiyacı ortadan kaldırmamak. • Yağmur veya çığ miktarına bağlı.
Süperhidrofobik kaplama	• Nanoyapılarla daha iyi kirlenme önleyici etki.	• Kısa ömür • UV ışınlaması nedeniyle belirsiz dayanıklılık.
Süperhidrofilik kaplama	• Son derece dayanıklı. • Süper hidrofobik kaplamadan daha etkili.	• Kaplamanın bozulması durumunda daha fazla kirlenme birikimine neden olur.
EDS	• Kuru ortam koşullarında %90 toz giderme verimliliği. • Hızlı temizleme işlemi.	• Çimentolama ve ıslak toz parçacıkları için verimsiz. • Yüksek bağlı nemde daha az etkilidir. • Yüksek gerilimli elektrik tedariki. • Yüksek başlangıç maliyeti.

Tablo 2 incelendiğinde kirlenme giderme verimliliği, teknik güvenilirlik ve işçilik maliyetleri gibi teknik-ekonomik faktörler dikkate alındığında, hiçbir yaklaşımın tüm saha özelindeki kirlenme sorunlarına uygun olmadığı görülmüştür. Kirlenmeyi önleyici teknikler gibi önleyici yaklaşımların PV modüllerinin kirlenmesini azaltmada etkili olduğu bildirilse de, temizlik ihtiyacı ortadan kaldırılamaz. Özetle, hem manuel temizlik hem de mekanik temizlik, kirlenmeyi azaltma için hala en uygun yaklaşımlardır (Song ve ark. 2021).

Enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak için araştırılması gereken önemli bir parametre temizlik sıklığıdır. Optimum temizlik sıklığı genellikle deneysel olarak belirlenir ve hava koşullarına, hava kalitesine, yağış oranına, toz oranına, eğim ve meyil açısına, enerji fiyatına, konuma, PV tasarımına, temizlik maliyetine ve özellikle kaplamalı PV panellerde PV panelin yüzey özelliklerine bağlıdır (Abdallah ve ark. 2022, Shah ve ark.2020).

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, literatür taraması yoluyla güneş panelleri üzerinde oluşan toz birikmesinin enerji üretimi ve verimliliği üzerine olumsuz etkileri ile temizlik yöntemlerine genel bir bakış sunmaktadır. Çalışmalarda, toz birikiminin ciddi bir endişe kaynağı olduğu buna bağlı olarak önemli ölçüde elektriksel ve ekonomik kayıplara yol açtığı açıkça belirtilmekte olup, güneş paneli temizliği konusunun giderek artan bir ilgi gördüğü vurgulanmaktadır.

Çalışmada, panel kirliliğini azaltmaya yönelik olarak doğal, manuel, otomatik temizleme gibi onarıcı yaklaşımlar, kir tutmaz kaplamalar ve elektrodinamik toz kalkanı gibi önleyici yaklaşımlar incelenmiştir. Bu teknikler, iklim koşullarına, kurulum ölçeğine, kaynak mevcudiyetine ve ekonomik kısıtlamalara bağlı olarak farklı avantajlara ve sınırlamalara sahiptir.

Fotovoltaik sistemlerde tozlanmanın azaltılmasına yönelik literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, farklı temizleme teknolojileri ile çevresel faktörlerin panel performansı üzerindeki etkilerinin kapsamlı biçimde değerlendirildiği görülmektedir. Ancak, mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, teknik, ekonomik ve çevresel kriterleri birlikte ele alarak bölgeye özgü koşullara uyarlanmış en uygun temizleme stratejisinin belirlenmesine yönelik sistematik ve karar destek odaklı metodolojik yaklaşımlar sunmada yetersiz kaldığı görülmektedir.

Önemli literatür bulguları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- ◆ Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) 2024 yılı raporunda, küresel güneş enerjisi PV kapasitesinin ivme kazanarak artacağını öngörmekte ve bunu 2030 yılına kadar küresel enerji sistemlerinin temel taşı olarak konumlandırmaktadır.
- ◆ Fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği, nem, rüzgâr hızı,

yağış, sıcaklık, toz birikimi ve kuş pislikleri gibi çevresel ve atmosferik faktörlerden etkilenir, bunlara bağlı olarak güneş panellerinin verimliliği ve elektrik üretimi önemli oranda düşüşe neden olmaktadır.

♦ Fotovoltaik panellerdeki performans düşüşü sadece enerji verimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda güneş enerjisi projelerinin ekonomik değerlendirilmesinde kritik bir ölçüt olan LCOE'yi de artırır.

• ♦ Güneş enerjisi projelerinin değerlendirilmesi, verimlilik kayıplarını azaltacak ve enerji üretimini artıracak şekilde yerel çevre koşullarına uyarlanmış, maliyet açısından etkin, bölgeye özgü temizlik ve azaltma stratejileri gerektirmektedir.

♦ Son yıllarda, kirlenmeyi önleyici kaplamalardan robotik temizleme sistemlerine kadar çok sayıda temizleme ve toz azaltma yönteminin geliştirildiği görülmekle birlikte, PV temizleme ve toz azaltma yöntemlerine ilişkin mevcut çalışmalar genellikle belirli tekniklere odaklanmakta olup, farklı işletme koşulları ve uygulama senaryolarını kapsayan kapsamlı karşılaştırmalar sunmamaktadır.

♦ Drone'ların sınırlı uçuş süresi ve şarj süresi gibi bazı sınırlamaları vardır; bunlar temizleme döngülerinin optimize edilmesi ve güç kaynağının özelleştirilmesiyle azaltılabilir.

♦ Elektrostatik ve titreşim esaslı temizleme teknolojileri, PV sistemlerinde kirlenme kontrolüne yönelik yenilikçi çözümler arasında yer almaktadır. Özellikle elektrodinamik toz kalkanı (EDS) teknolojisi, su kullanımına veya mekanik hareketli bileşenlere ihtiyaç duymadan panel yüzeyine tutunan toz parçacıklarının uzaklaştırılmasında başarılı sonuçlar vermiş olup, kurak ve tozlu bölgelerde uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

♦ Çalışmalar, temizleme sıklığının optimizasyonuna odaklanmış olmakla birlikte, uygulayıcılara daha bütüncül ve uygulanabilir bir karar destek çerçevesi sunabilmek için bu konunun ekonomik fizibilite, bölgesel koşullara uygulanabilirlik ve yöntem seçimine ilişkin yaklaşımlarla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Literatür taraması ile gerçekleştirilen bu çalışmada, enerji üretimi ve verimliliğini optimize etmek için güneş panellerinin temizlenmesinin önemi vurgulanmakta ve mevcut temizlik uygulamalarının yanı sıra uygun temizlik yönteminin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken temel faktörler hakkında bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışma, araştırmacılara, yatırımcılara ve temizlik operatörlerine karar verme noktasında ulaşmayı hedeflemektedir.

KAYNAKÇA

- Abdallah, R., Juaidi, A., Abdel-Fattah, S., Qadi, M., Shadid, M., Albatayneh, A., Çamur, H., García-Cruz, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2022). The Effects of Soiling and Frequency of Optimal Cleaning of PV Panels in Palestine. *Energies*, 15(12), 4232. <https://doi.org/10.3390/en15124232>
- Abdelsalam, M.A.M., Ahmad, F.F., Hamid, A.K., Ghenai, C., Rejeb, O., Alchadirchy, M., Obaid, W., Assad, M.E.H., (2021). Experimental study of the impact of dust on azimuth tracking solar PV in Sharjah. *Int. J. Electr. Comput. Eng*, 11(5), 3671-3681.
- Ahmed, A., Elsakka, M.M., Elhenawy, Y., Amer, A.E., Mansi, A., Bassyouni, M., Gaddalla, M.A., Refaat, A., (2024). Experimental investigation of a nano coating efficiency for dust mitigation on photovoltaic panels in harsh climatic conditions. *Scientific Reports*, 14(1), 23013.
- Akkoyunlu, M. T., & Abdallatif, Y. (2024). A comprehensive investigation of solar panel cleaning technologies: A review study. *Journal of Thermal Engineering*, 10(6), 1715-1741.
- Al-Housani, M., Bicer, Y., & Koç, M. (2019). Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: Comparison of cleaning techniques for drone retrofitting. *Energy Conversion and Management*, 185, 800-815.
- Aljaghoub, H., Abumadi, F., AlMallahi, M. N., Obaideen, K., & Alami, A. H. (2022). Solar PV cleaning techniques contribute to Sustainable Development Goals (SDGs) using Multi-criteria decision-making (MCDM): Assessment and review. *International Journal of Thermofluids*, 16, 100233.
- Aljdaeh, E., Kamwa, I., Hammad, W., Abuashour, M. I., Sweidan, T. E., Khalid, H. M., & Muyeen, S. M. (2021). Performance enhancement of self-cleaning hydrophobic nanocoated photovoltaic panels in a dusty environment. *Energies*, 14(20), 6800.
- Alshareef, M. J. (2023). A comprehensive review of the soiling effects on PV module performance. *IEEE Access*, 11, 134623-134651.
- Cano, J., John, J. J., Tatapudi, S., & TamizhMani, G. (2014, June). Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules. In *2014 IEEE 40th photovoltaic specialist conference (PVSC)* (pp. 3174-3176). IEEE.
- Cao, S., Wang, Y., Wang, Z., & Yang, J. (2022, September). Research on the application of super-hydrophilic self-cleaning coating in photovoltaic power plant. In *2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)* (pp. 899-904). IEEE.

- Cattani, L., Cattani, P., & Magrini, A. (2021). Photovoltaic cleaning optimization: a simplified theoretical approach for air to water generator (AWG) system employment. *Energies*, 14(14), 4271.
- Chadly, A., Aldayyani, H. Y., Hamasha, M. M., Amer, S. E., Maalouf, M., & Mayyas, A. (2024). Selection of optimal strategy for managing decentralized solar PV systems considering uncertain weather conditions. *Scientific Reports*, 14(1), 12269.
- Chanchangi, Y. N., Roy, A., Ghosh, A., Sundaram, S., & Mallick, T. K. (2021). In-situ assessment of photovoltaic soiling mitigation techniques in northern Nigeria. *Energy conversion and management*, 244, 114442.
- Conceicao, R., Gonzalez-Aguilar, J., Merrouni, A. A., & Romero, M. (2022). Soiling effect in solar energy conversion systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112434.
- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M. A., & Alawadhi, H. (2015). Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 735-744.
- Deb, D., & Brahmabhatt, N. L. (2018). Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3306-3313.
- Derakhshandeh, J. F., AlLuqman, R., Mohammad, S., AlHussain, H., AlHendi, G., AlEid, D., & Ahmad, Z. (2021). A comprehensive review of automatic cleaning systems of solar panels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101518.
- DRONE VOLT, <https://www.dronevolt.com/en/expert-solutions/hercules-20-spray/>, Erişim Tarihi: 10.06.2026
- Ekren, N., Sarkin, A. S., & Sağlam, Ş. (2022). A hydrophobic antireflective and antidust coating with SiO₂ and TiO₂ nanoparticles using a new 3-D printing method for photovoltaic panels. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(4), 1014-1026.
- EMBER ENERGY, <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf>. Erişim Tarihi: 21.02.2025.
- Fathi, M., Abderrezek, M., & Friedrich, M. (2017). Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(2), 577-585.
- Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Perez, O. (2018). Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 566-579.
- Gandomzadeh, M., Yaghoubi, A., Hoorsun, A., Parsay, A., Gholami, A., Zandi, M., Ga-

- vagsaz-Ghoachani, R., Kazem, H., (2025). Dust mitigation methods and multi-criteria decision-making cleaning strategies for photovoltaic systems: Advances, challenges, and future directions. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101629.
- Ghazi, S., Sayigh, A., & Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces–A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 742-751.
- Gochhait, S., Asodiya, R., Hasarmani, T., Patin, V., & Maslova, O. (2022, November). Application of IoT: a study on automated solar panel cleaning system. In *2022 4th International conference on electrical, control and instrumentation engineering (ICECIE)* (pp. 1-4). IEEE.
- Guo, B., & Javed, W. (2017). Efficiency of electrodynamic dust shield at dust loading levels relevant to solar energy applications. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 196-202.
- Gupta, V., Sharma, M., Pachauri, R. K., & Babu, K. D. (2019). Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques. *Solar Energy*, 191, 596-622.
- Hassan, G., Yilbas, B. S., Al-Sharafi, A., Al-Sulaiman, F., & Abubakar, A. A. (2024). Dust mitigation strategies concerning solar energy applications: A comprehensive review. *Solar Energy*, 277, 112728.
- He, B., Lu, H., Zheng, C., & Wang, Y. (2023). Characteristics and cleaning methods of dust deposition on solar photovoltaic modules-A review. *Energy*, 263, 126083.
- Hooshyar, P., Moosavi, A., & Borujerdi, A. N. (2024). Enhanced dust reduction method for solar panels application. *Scientific Reports*, 14(1), 30351.
- Hopke, J.E., Hestres, L.E., 2017. "Communicating about Fossil Fuel Divestment", <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.566>, Erişim Tarihi: 25.04.2026
- Hudedmani, M. G., Joshi, G., & Revankar, A. (2017). A comparative study of dust cleaning methods for the solar PV panels. *Advanced Journal of Graduate Research*, 1(1), 24-29.
- IEA PVPS, Snapshot of Global PV Markets 2025, <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2025>.
- Ilse, K., Micheli, L., Figgis, B.W, Lange, K., Daßler, D., Hanifi, H., Wolfertstetter, F., Naumann, V., Hagendorf, C., Gottschalg, R., and Bagdahn, J., (2019). Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. *Joule*, 3(10), 2303-2321.
- ISRAR, ENGINEERING LLC, <https://www.israar.com/PVCleaningMachine.php#overview>. Erişim Tarihi 15.04.2026.

- Jamil, W. J., Rahman, H. A., Shaari, S., & Salam, Z. (2017). Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 876-891.
- Jiang, Y., Lu, L., Ferro, A. R., & Ahmadi, G. (2018). Analyzing wind cleaning process on the accumulated dust on solar photovoltaic (PV) modules on flat surfaces. *Solar Energy*, 159, 1031-1036.
- Ju, F., & Fu, X. (2011, September). Research on impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance. In *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering* (pp. 3601-3606). IEEE.
- Kaiss, E. C. A., & Hassan, N. M. (2024). Optimizing the cleaning frequency of solar photovoltaic (PV) systems using numerical analysis and empirical models. *Renewable Energy*, 228, 120691.
- Kawamoto, H., & Shibata, T. (2015). Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels. *Journal of Electrostatics*, 73, 65-70.
- Kawamoto, H., & Guo, B. (2018). Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels. *Journal of Electrostatics*, 91, 28-33.
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H., & Sopian, K. (2020). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123187.
- Kurokawa, K., Komoto, K., Veleuten, P.V., Faiman, D., 2012. Energy from the desert: Practical Proposals for Very Large Scale Photovoltaic Systems, London U.K., Earthscan, ISBN 978-1-84407-363-4.
- De Longueville, F., Hountondji, Y. C., Henry, S., & Ozer, P. (2010). What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions?. *Science of the total environment*, 409(1), 1-8.
- Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 3124-3131.
- Maghami, M. R. (2026). Impact of dust deposition on photovoltaik systems and mitigation strategies. *Technologies*, 14(1), 15, 1-44.
- Marathe, S. A., & Patil, B. P. (2020, July). Mechanisms for improving the productivity of the existing photovoltaic panels: A review. In *2020 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)* (pp. 087-090). IEEE.
- Masson, V., Bonhomme, M., Salagnac, J. L., Briottet, X., & Lemonsu, A. (2014). Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 14.

- Mazumder, M., Sharma, R., Biris, A., Horenstein, M., Zhang, J., Ishihara, H., Stark, J., Blumenthal, S., Sadler, O., (2011). Electrostatic removal of particles and its applications to self-cleaning solar panels and solar concentrators. In *Developments in surface contamination and cleaning* (pp. 149-199). William Andrew Publishing.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5), 2920-2925..
- Mondal, A. K., & Bansal, K. (2015). Structural analysis of solar panel cleaning robotic arm. *Current Science*, 108(6), 1047-1052..
- Najmi, N., & Rachid, A. (2023). A review on solar panel cleaning systems and techniques. *Energies*, 16(24), 7960.
- NOMADD, <https://www.nomaddesertsolar.com/services.html>, Erişim Tarihi: 08.06.2026.
- Nomeir, B., Lakhoul, S., Boukheir, S., Ait Ali, M., & Naamane, S. (2023). Recent progress on transparent and self-cleaning surfaces by superhydrophobic coatings deposition to optimize the cleaning process of solar panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 257, 112347.
- Patil, P. A., Bagi, J. S., & Wagh, M. M. (2017, August). A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 250-256). IEEE.
- Pavan, A.M., Mellit, A., De Pieri, D., 2011 “The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants”, *Solar. Energy*, Vol. 85, Issue 5, pp. 1128–1136.
- REN21, Global Status Report 2025, <https://www.ren21.net/gsr-2025/technologies/solar-pv/> Erişim Tarihi 21.05.2026.
- Reset Solar Temizleme, <https://resetsolartemizleme.com/gunes-panellerinin-kisin-temizligi-verimlilik-artirmanin-yollari/> Erişim Tarihi 07.05.2026
- Quan, Z., Lu, H., Zhao, W., Zheng, C., Zhu, Z., Qin, J., & Yue, M. (2022). A review of dust deposition mechanism and self-cleaning methods for solar photovoltaic modules. *Coatings*, 13(1), 49.
- Said, S. Z., Islam, S. Z., Radzi, N. H., Wekesa, C. W., Altimania, M., & Uddin, J. (2024). Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions. *Energy Reports*, 12, 1121-1141.
- Said, S.M, Walwil, H.M., 2014. “Fundamental studies on dust fouling effect on PV module performance”, *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 328-337.

- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 22, 698-733.
- Sepúlveda-Oviedo, E. H. (2025). Optimizing PV maintenance: Methods, cleaning frequency, and a selection protocol. *Energy Reports*, 14, 1578-1605.
- SERBOT, <https://www.serbot.ch/en/solar-panels-cleaning>, Erişim Tarihi 03.06.2026.
- Shah, A. H., Hassan, A., Laghari, M. S., & Alraeesi, A. (2020). The influence of cleaning frequency of photovoltaic modules on power losses in the desert climate. *Sustainability*, 12(22), 9750.
- Son, J., Kundu, S., Verma, L. K., Sakhuja, M., Danner, A. J., Bhatia, C. S., & Yang, H. (2012). A practical superhydrophilic self cleaning and antireflective surface for outdoor photovoltaic applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98, 46-51.
- Song, Z., Liu, J., & Yang, H. (2021). Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation: A comprehensive review. *Applied Energy*, 298, 117247.
- Tanaka, T. Y., & Chiba, M. (2006). A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 88-104.
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., & Urmee, T. (2016). Dust effect and its economic analysis on PV modules deployed in a temperate climate zone. *Energy Procedia*, 100, 65-68.
- Tejwani, R., & Solanki, C. S. (2010, June). 360 sun tracking with automated cleaning system for solar PV modules. In *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 002895-002898). IEEE.
- Ullah, A., Amin, A., Haider, T., Saleem, M., & Butt, N. Z. (2020). Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan. *Renewable Energy*, 150, 456-468.
- WASH PANEL, <http://www.washpanel.com/en/documenti.php>, Erişim Tarihi 03.06.2026.
- Yakubu, S., Samikannu, R., Gawusu, S., Wetajega, S. D., Okai, V., Shaibu, A. K. S., & Workneh, G. A. (2025). A holistic review of the effects of dust buildup on solar photovoltaic panel efficiency. *Solar Compass*, 13, 100101.
- Zahedi, R., Ranjbaran, P., Gharehpetian, G. B., Mohammadi, F., & Ahmadihangar, R. (2021). Cleaning of floating photovoltaic systems: A critical review on approaches from technical and economic perspectives. *Energies*, 14(7), 2018.



FİZİK BİLGİLİ YAPAY SİNİR
AĞLARI (PINN) İLE BİRLEŞİK
YÜKLEME ALTINDAKİ YAPISAL
MALZEMELERİN MEKANİK
ANALİZİ: ALÜMİNYUM 7075-T6
UYGULAMASI

“ ”

Agah Aygahoğlu¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı, agah.aygahoglu@dpu.edu.tr , ORCID NO: 0000-0002-6556-8663

1. Giriş

Mühendislik tasarımlarında yapısal bileşenler nadiren tek bir yönde zorlamaya maruz kalırlar. Genellikle, eksenel çekme/basma, eğilme ve burulma gibi çeşitli zorlanma türlerinin eş zamanlı olarak etki ettiği birleşik yükleme durumları ile de karşılaşmaktadır. Havacılık yapılarında kanat kirişleri, helikopter şaftları, otomotiv aksları ve rüzgar türbini kanatları bu duruma en bariz örneklerdir. Bu bileşenlerin tasarımı, güvenlik sınırlarının belirlenmesi ve malzeme hasar analizlerinin gerçekleştirilmesi için gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin hassas bir şekilde hesaplanması büyük önem taşır (Beer F.B., 2020)

Geleneksel olarak, çoklu zorlanma problemlerinin çözümü ya analitik basitleştirmelerle ya da Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) gibi sayısal analiz araçlarıyla yapılır. Analitik yöntemler karmaşık geometri ve sınır şartlarının olduğu durumlarda yetersiz kalırken, SEY yüksek ağ (mesh) yoğunluğu gereksinimi ve uzun hesaplama süreleri ile sınırlanmaktadır. Son yıllarda, derin öğrenmenin fiziksel bilimlere uygulanmasıyla ortaya çıkan Fizik Bilgili Yapay Sinir Ağları (PINN - Physics-Informed Neural Networks), katı mekaniğindeki kısmi ve normal diferansiyel denklemlerin çözümünde kolaylaştırıcı bir alternatif sunmaktadır (Raissi, M., et al., 2019). PINN, veri setine ihtiyaç duymadan, fiziksel kuralları ve sınır koşullarını doğrudan optimizasyon sürecine dahil ederek diferansiyel denklemleri çözebilen bir derin öğrenme metodolojisidir.

Bu çalışmada, yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle uçak gövde ve kanat yapılarında yaygın olarak kullanılan, T6 çökelme sertleştirilmesi (yaşlandırma) işlemi uygulanmış Alüminyum 7075'den imal edilen dairesel kesitli bir mil ele alınmıştır. Mil, eksenel çekme yükü, enine eğilme yükü ve burulma momentinin birleşik etkisi altındadır. Çalışmanın temel amacı, bu üç temel mekanik yüklemenin oluşturduğu yer değiştirme, sehim ve dönme alanlarını PyTorch tabanlı bir PINN modeli geliştirerek çözmek ve elde edilen sonuçları klasik mukavemet teorilerinden türetilen tam analitik çözümlerle karşılaştırmaktır. Elde edilen bulgular, yapay zekanın yapısal analiz uygulamalarındaki hassasiyetini ve güvenilirliğini ortaya koyacaktır.

2. Malzeme Özellikleri: Alüminyum 7075-T6

Alüminyum 7075 alaşımı, genel olarak Al-Zn-Mg-Cu bileşenlerinden oluşan, ısıtılma ile sertleştirilebilen yüksek mukavemetli bir havacılık alaşımıdır. Bu alaşıma uygulanan “T6” ısıtılma işlemi, malzemenin çözeltiye alma işleminden sonra yapay yaşlandırmaya (çökelme sertleştirilmesi) maruz bırakıldığını ifade eder. Bu işlem sırasında, matris içinde yarı-koherent eta-prime (η') ve koherent GP (Guinier-Preston) bölgeleri çökelerek atomsal düzlemlerin kayma hareketlerini engeller ve malzemenin akma dayanımını olabilecek en üst seviyeye çıkarır (Callister, W. D., et al.2018). Malzemenin yüksek mukavemeti kompozit yapılara kıyasla daha homojen ve izotropik mekanik özellikler sağlar, bu da analitik işlemler sonucu elde edilen hesaplamaların doğruluğunu artırır.

Çalışmada kullanılan milin mekanik ve geometrik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu parametreler hem analitik hesaplamalarda hem de PINN modelinin fiziksel kayıp terimlerinin kurulmasında girdi olarak kullanılmıştır.

Tablo 1: Alüminyum 7075-T6 Milinin Mekanik ve Geometrik Parametreleri

Parametre	Sembol & Birim	Değer
Mil Uzunluğu	L (m)	2.0
Mil Yarıçapı	R (m)	0.05 ($\varnothing$ 100 mm)
Elastisite Modülü	E (GPa)	71.7
Poisson Oranı	ν	0.33
Kayma Modülü	G (GPa)	26.95
Kesit Alanı	A (m ²)	7.854×10^{-3}
Eylemsizlik Momenti	I (m ⁴)	4.909×10^{-6}
Kutupsal Eylemsizlik Momenti	J (m ⁴)	9.818×10^{-6}
Akma Mukavemeti	σ_y (MPa)	503

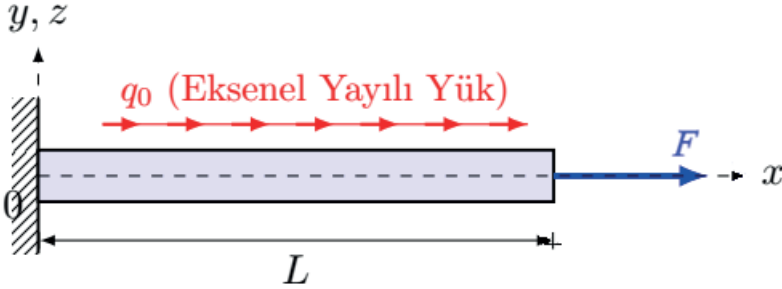
3. Matematiksel Model ve Analitik Çözümler

Dairesel kesitli milin maruz kaldığı birleşik yükleme durumu; eksenel çekme, enine eğilme ve burulma bileşenlerinin süperpozisyonu ile modellenmiştir. Bu

yüklemelerin oluşturduğu diferansiyel denklemler ve sınır şartları aşağıda verilmiştir.

3.1. Eksenel Çekme Modeli

Eksenel yükleme altında milin uzama davranışı tek boyutlu elastik çubuk teorisi ile yönetilir. Şekil 1’de ankastre mesnetlenmiş ve yayılı eksenel yük ile serbest uçtan tekil kuvvete maruz çubuk modeli şematize edilmiştir.



Şekil 1: Eksenel yükleme altındaki mil elemanının şematik diyagramı

Eksenel yayılı yük q_0 ve uçtaki tekil F kuvveti etkisi altındaki diferansiyel denklem, Denklem (1) ile ifade edilir:

$$E \cdot A \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} + q_0 = 0, \quad x \in (0, L) \quad (1)$$

Sınır değerleri sırasıyla ankastre mesnet ($x = 0$) ve serbest uçtaki ($x = L$) eksenel kuvvettir. Bu sınır şartları Denklem (2) altında tanımlanmıştır:

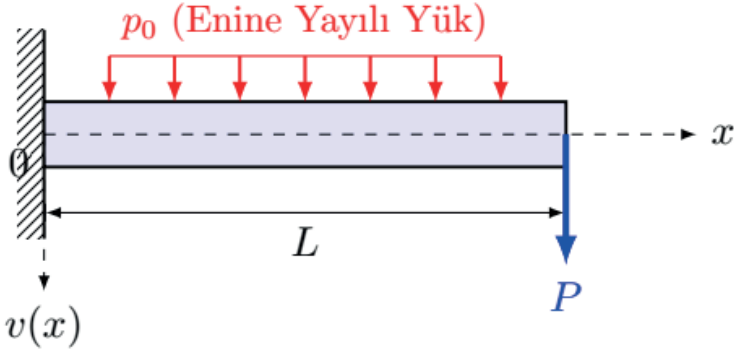
$$u(0) = 0, \quad E \cdot A \cdot \frac{du}{dx}(L) = F \quad (2)$$

Denklem (1) ile verilen ana denklemin, Denklem (2) sınır şartları altında entegrasyonu ile elde edilen tam analitik çözümü Denklem (3) ile verilmiştir:

$$u(x) = \frac{x}{E \cdot A} \cdot \left[F + q_0 \cdot \left(L - \frac{x}{2} \right) \right] \quad (3)$$

3.2. Enine Eğilme Modeli

Enine düzlemde etki eden eğilme davranışı klasik Euler-Bernoulli kiriş teorisi ile açıklanır. Şekil 2’de yayılı enine sehîm yükü ve serbest uçtan tekil kuvvete maruz ankastre kiriş şeması verilmiştir.



Şekil 2: Enine eğilme yüküne maruz ankastre kiriş şeması

Mil boyunca etki eden p_0 yayılı yükü ve serbest uçtaki tekil enine P kuvveti altındaki 4. mertebeden yönetim denklemi Denklem (4) ile tanımlanmıştır:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 v}{dx^4} - p_0 = 0, \quad x \in (0, L) \quad (4)$$

Ankastre ve serbest uç sınır koşulları ise Denklem (5) ile verilir:

$$v(0) = 0, \quad \frac{dv}{dx}(0) = 0, \quad \frac{d^2 v}{dx^2}(L) = 0, \quad E \cdot I \cdot \frac{d^3 v}{dx^3}(L) = -P \quad (5)$$

Bu diferansiyel sistemin tam analitik çözümü entegrasyonu ile Denklem (6) elde edilir:

$$v(x) = \frac{p_0}{24EI} \cdot [(x-L)^4 - L^4] + \frac{p_0 L^3}{6EI} \cdot x - \frac{P}{6EI} \cdot [(x-L)^3 + L^3] + \frac{PL^2}{2EI} \cdot x \quad (6)$$

3.3. Burulma Modeli

Saint-Venant burulma teorisine göre dairesel milin burulma açısı (θ) dağılımı, yayılı t_0 torku ve serbest uçtaki tekil T torku altında Denklem (7)'de ifade edilmiştir. Şekil 3'te burulma torklarına maruz dairesel şaft şeması verilmiştir.



Şekil 3: Burulma yükü altındaki dairesel şaft şeması

$$G \cdot J \cdot \frac{d^2 \theta}{dx^2} + t_0 = 0, \quad x \in (0, L) \quad (7)$$

Ankastre uçta dönme ankastre mesnet tarafından engellenmiş olup, serbest uçta ise dış tork dengesi mevcuttur. Bu sınır koşulları Denklem (8) ile özetlenmiştir:

$$\theta(0) = 0, \quad G \cdot J \cdot \frac{d\theta}{dx}(L) = T \quad (8)$$

Denklem (7)'nin Denklem (8) sınır şartları altında çözümü olan analitik ifade Denklem (9) ile verilmiştir:

$$\theta(x) = \frac{x}{G \cdot J} \cdot \left[T + t_0 \cdot \left(L - \frac{x}{2} \right) \right] \quad (9)$$

4. Fizik Bilgili Yapay Sinir Ağları (PINN) Metodolojisi

Klasik veri odaklı derin öğrenme modelleri büyük miktarda etiketlenmiş eğitim veri setine ihtiyaç duyarken, Fizik Bilgili Yapay Sinir Ağları (PINN) fiziksel yasaları yöneten diferansiyel denklemleri kayıp (loss) fonksiyonuna dahil ederek veri-bağımsız çalışabilir (Karniadakis, G. E., et al.2021, Lu, L., et al.2021). Katı mekanik ve yapısal analiz uygulamalarında, denetimli makine öğreniminden farklı olarak, PINN modelleri elastisite teorisinin diferansiyel denklemlerini doğrudan kısıtlamalar olarak optimize eder (Haghighat, E., et al.2021).

Bu çalışmada, girdi olarak normalleştirilmiş şaft pozisyonunu ($\hat{x} \in [0,1]$) olan ve çıktı olarak sırasıyla eksenel yer değiştirme, enine sehim ve burulma açısı tahminlerini temsil eden üç normalleştirilmiş mekanik bileşeni ($\hat{u}, \hat{v}, \hat{\theta}$) tahmin eden bir Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) mimarisi tasarlanmıştır.

Büyük büyüklükteki farklılıklardan kaynaklanabilecek gradyan dengesizliklerini ve optimizasyon zorluklarını önlemek için, Haghighat E. ve diğerlerinin çalışmasındaki normalleştirme yaklaşımı benimsenmiştir (Haghighat, E., et al.2021). Giriş ve çıkış değişkenleri aşağıdaki bağıntılarla normalleştirilmiştir:

$$\hat{x} = \frac{x}{L}, \quad u = u_c \cdot \hat{u}, \quad v = v_c \cdot \hat{v}, \quad \theta = \theta_c \cdot \hat{\theta}$$

Burada ölçekleme katsayıları $u_c = 1$ mm, $v_c = 10$ mm ve $\theta_c = 0.1$ rad olarak seçilmiştir. Bu, yapay sinir ağının çıktılarının yaklaşık olarak $[-1,1]$ aralığında kalmasını sağlayarak optimizasyon kararlılığını artırır.

4.1. Eksenel Çekme Kısıtlarının Formülasyonu

Eksenel yükleme altında elastik uzama davranışı 1 boyutlu çubuk teorisi tarafından yönetilir. Fiziksel kısıtın sinir ağına entegre edilmesi için otomatik türev (Automatic Differentiation - AD) zincir kuralı kullanılarak ağ çıktısı $\hat{u}$ 'nın girdiye göre türevleri alınır. Fiziksel kalıntı (residual) $r_u(\hat{x})$ şu şekilde tanımlanmıştır:

$$r_u(\hat{x}) = E \cdot A \cdot \left(\frac{u_c}{L^2}\right) \cdot \frac{d^2 \hat{u}}{d\hat{x}^2} + q_0 = 0 \quad (10)$$

Mil boyunca homojen olarak dağıtılmış 200 eş konum noktasındaki bu terimin ortalama kare hatası, eksenel PDE kaybını oluşturur:

$$\text{Loss}_{\text{PDE},u} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} |r_u(\hat{x}_i)|^2 \quad (11)$$

4.2. Enine Eğilme Kısıtlarının Formülasyonu

Enine eğilme mekanizması Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayanmaktadır. Dördüncü dereceden diferansiyel denklemin otomatik türevle çözülebilmesi için PINN modelinde $\hat{v}$ çıktısının dördüncü dereceden türevi hesaplanır. Eğilme kalıntısı $r_v(\hat{x})$ aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$r_v(\hat{x}) = E \cdot I \cdot \left(\frac{v_c}{L^4}\right) \cdot \frac{d^4 \hat{v}}{d\hat{x}^4} - p_0 = 0 \quad (12)$$

Benzer şekilde, enine eğilme için PDE kaybı şu şekildedir:

$$\text{Loss}_{\text{PDE},v} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} |r_v(\hat{x}_i)|^2 \quad (13)$$

4.3. Burulma Kısıtlarının Formülasyonu

Saint-Venant burulma teorisi çerçevesinde mil boyunca burulma açısı dağılımı θ için kalıntı denklemi $r_\theta(\hat{x})$ şu şekilde elde edilir:

$$r_{\theta}(\hat{x}) = G \cdot J \cdot \left(\frac{\theta_c}{L^2}\right) \cdot \frac{d^2 \hat{v}}{d\hat{x}^2} + t_0 = 0 \quad (14)$$

Burulma kısıtı için PDE kaybı:

$$\text{Loss}_{\text{PDE},\theta} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} |r_{\theta}(\hat{x}_i)|^2 \quad (15)$$

4.4. Sınır Koşulları ve Toplam Kayıp Fonksiyonu

PINN modelinin eğitimi, PDE kayıpları ve sınır koşulu (Boundary Conditions – BC) kayıplarının süperpozisyonundan oluşan çok amaçlı bir optimizasyon problemidir (Karniadakis, G. E., et al.2021). Ankastre uçtaki ($\hat{x} = 0$) geometrik sınır koşulları için kayıp terimi:

$$\text{Loss}_{\text{BC0}} = \hat{u}(0)^2 + \hat{v}(0)^2 + \left(\frac{d\hat{v}}{d\hat{x}}\Big|_{\hat{x}=0}\right)^2 + \hat{\theta}(0)^2 \quad (16)$$

Serbest uçtaki ($\hat{x} = 1$) statik ve kuvvet sınır koşullarına (eksenel kuvvet, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma torku dengesi) ait kayıp terimi:

$$\text{Loss}_{\text{BCL}} = \left(EA \frac{u_c}{L} \frac{d\hat{u}}{d\hat{x}}\Big|_{\hat{x}=1} - F\right)^2 + \left(\frac{d^2 \hat{v}}{d\hat{x}^2}\Big|_{\hat{x}=1}\right)^2 + \left(EI \frac{v_c}{L^3} \frac{d^3 \hat{v}}{d\hat{x}^3}\Big|_{\hat{x}=1} + P\right)^2 + \left(GJ \frac{\theta_c}{L} \frac{d\hat{\theta}}{d\hat{x}}\Big|_{\hat{x}=1} - T\right)^2 \quad (17)$$

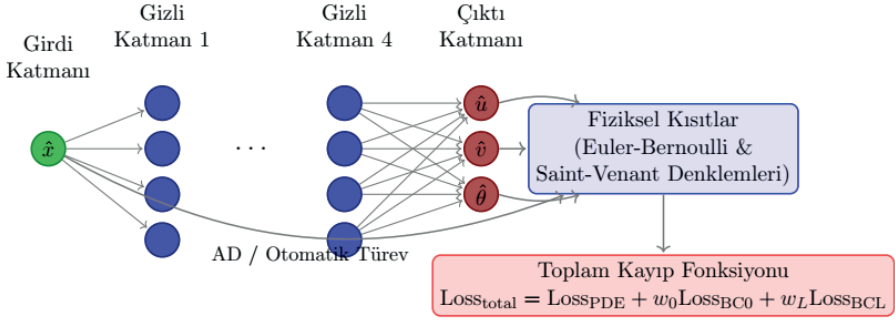
Böylece sinir ağının optimize ettiği toplam kayıp fonksiyonu ($\text{Loss}_{\text{total}}$):

$$\text{Loss}_{\text{total}} = \text{Loss}_{\text{PDE}} + w_0 \cdot \text{Loss}_{\text{BC0}} + w_L \cdot \text{Loss}_{\text{BCL}} \quad (18)$$

bulunur. Burada $\text{Loss}_{\text{PDE}} = \text{Loss}_{\text{PDE},u} + \text{Loss}_{\text{PDE},v} + \text{Loss}_{\text{PDE},\theta}$ olarak tanımlıdır. w_0 ve w_L ise sınır koşullarının gradyan akışını dengelemek için kullanılan ağırlık katsayılarıdır.

Ağ yapısı, her biri 50 nöron ve Tanh aktivasyon fonksiyonu içeren 4 gizli katmandan oluşmaktadır. Model, Adam optimizasyon algoritması kullanılarak 12,000 epoch boyunca eğitilmiştir.

Şekil 4, bu çalışmada tasarlanan ve eğitilen PINN mimarisinin görsel bir şemasını göstermektedir. Bu şema, normalleştirilmiş giriş katmanını ($\hat{x}$), gizli katmanlar (MLP), çıktı katmanı ($\hat{u}, \hat{v}, \hat{\theta}$) ve otomatik türevi (AD) fiziksel denklemlerle birleştiren kayıp fonksiyonunun (Loss) hesaplanmasında yer alan adımları göstermektedir.



Şekil 4: Önerilen Fizik Bilgili Yapay Sinir Ağı (PINN) Mimarisi ve Eğitim Akış Şeması

4.5. PyTorch Tabanlı PINN Çözücü Kod Yapısı

PyTorch kütüphanesi kullanılarak yazılan “geliştirilen model”in en kritik kod blokları aşağıda verilmiştir. Kod Listesi 1, modelin sinir ağı mimarisini gösterirken, Kod Listesi 2, diferansiyel denklemlerin ve sınır koşullarının gradyanlarının hesaplandığı ve otomatik bir türev kütüphanesi kullanılarak eğitildiği kritik optimizasyon döngüsünü göstermektedir.

```

1  # PINN Model Tanimi
2  class PINN (nn. Module ):
3  def __init__ (self , input_dim =1, output_dim =3, hidden_dim =50 ,
4  layers =4):
5  super (PINN , self ). __init__ ()
6  # 1 Girdi : normalize mil konumu ( x_hat )
7  # 3 Cikti : normalize yer degistirmeler (u_hat , v_hat , theta_hat )
8  net = []
9  net.append (nn. Linear ( input_dim , hidden_dim ))
10 net.append (nn. Tanh ())
11 for _ in range ( layers - 1):
12 net.append (nn. Linear ( hidden_dim , hidden_dim ))
13 net.append (nn. Tanh ())
14 net.append (nn. Linear ( hidden_dim , output_dim ))
15 self .net = nn. Sequential (* net)
16
17 def forward (self , x):
18     return self .net(x)

```

Kod Listesi 1: PyTorch ile tasarlanan çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) PINN mimarisi

```

1  # Egitim dongusu icindeki can alici kisimlar
2  predictions = model ( x_hat_domain )
3  u_hat = predictions[:, 0:1]
4  v_hat = predictions[:, 1:2]
5  theta_hat = predictions[:, 2:3]
6
7  # 1. Eksenel turevler ( Otomatik Turev / Autograd )
8  u_hat_x = torch . autograd . grad ( u_hat , x_hat_domain , torch .
ones_like ( u_hat ),
9      create_graph = True )[0]
u_hat_xx = torch . autograd . grad ( u_hat_x , x_hat_domain , torch .
10 ones_like ( u_hat_x ),
11     create_graph = True )[0]
12
# 2. Egilme turevleri ( Otomatik Turev / Autograd )
13 v_hat_x = torch . autograd . grad ( v_hat , x_hat_domain , torch .
ones_like ( v_hat ),
14     create_graph = True )[0]
v_hat_xx = torch . autograd . grad ( v_hat_x , x_hat_domain , torch .
15 ones_like ( v_hat_x ),
create_graph = True )[0]
16 v_hat_xxx = torch . autograd . grad ( v_hat_xx , x_hat_domain , torch .
17 ones_like (
18     v_hat_xx ), create_graph = True )[0]
v_hat_xxxx = torch . autograd . grad ( v_hat_xxx , x_hat_domain ,
19 torch . ones_like (
v_hat_xxx ), create_graph = True )[0]
20
# 3. Burulma turevleri ( Otomatik Turev / Autograd )
21 theta_hat_x = torch . autograd . grad ( theta_hat , x_hat_domain ,
22 torch . ones_like (
23     theta_hat ), create_graph = True )[0]
24 19 theta_hat_xx = torch . autograd . grad ( theta_hat_x , x_hat_domain
25 , torch . ones_like (
26     theta_hat_x ), create_graph = True )[0]

```

```

27
28 # PDE Kalintilari ( Residuals )
29 axial_res = u_hat_xx + (q0 * L **2) / (E * A * u_c)
    bending_res = v_hat_xxxx - (p0 * L **4) / (E * I * v_c)
30 torsion_res = theta_hat_xx + (t0 * L **2) / (G * J * theta_c )
31
32 loss_pde = torch . mean ( axial_res **2) + torch . mean ( bending_res
33 **2) + torch . mean (
34     torsion_res **2)
35
36 # Sınır Kosullari ( Boundary Conditions )
    loss_bc_0 = ( u_hat [0] - 0) **2 + ( v_hat [0] - 0) **2 + ( v_hat_x [0] -
37 0) **2 + (
38     theta_hat [0] - 0) **2
39
40 axial_bc_L = u_hat_x [-1] - (F * L) / (E * A * u_c)
41 bending_bc_L2 = v_hat_xx [-1] - 0
    bending_bc_L3 = v_hat_xxx [-1] - (-P * L **3) / (E * I * v_c)
    torsion_bc_L = theta_hat_x [-1] - (T * L) / (G * J * theta_c )

    loss_bc_L = axial_bc_L **2 + bending_bc_L2 **2 + bending_bc_L3 **2
    + torsion_bc_L
        **2

# Toplam Kayip ve Optimizasyon
loss = loss_pde + 100.0 * loss_bc_0 + 100.0 * loss_bc_L
loss . backward ()
optimizer . step ()

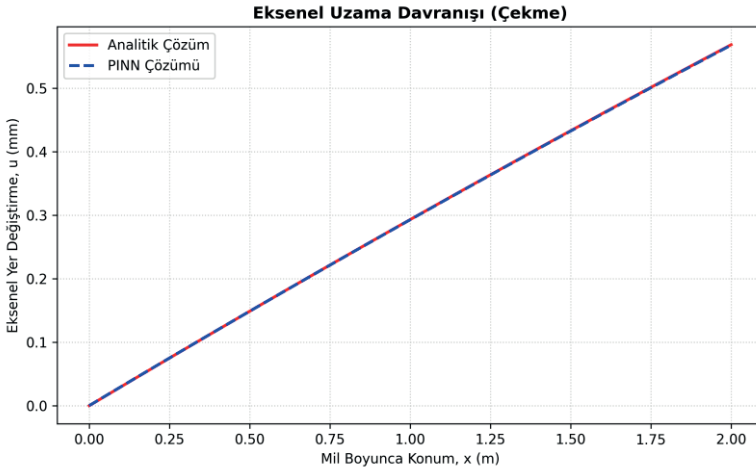
```

Kod Listesi 2: Otomatik türev yardımıyla diferansiyel denklemlerin (residual) ve sınır koşullarının optimizasyon döngüsü

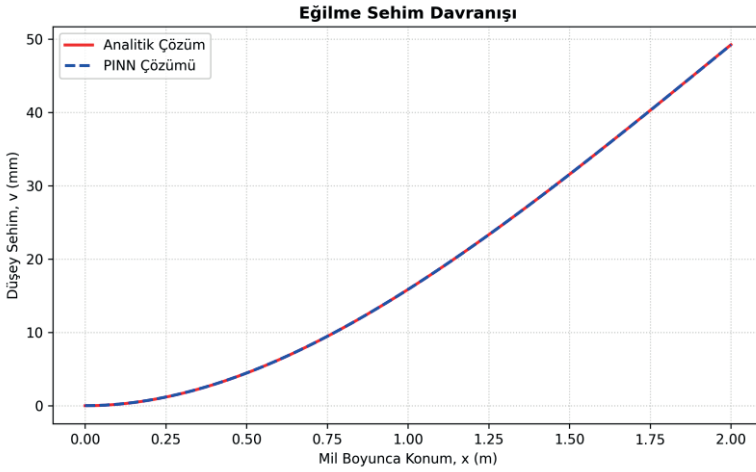
5. Bulgular ve Karşılaştırma

Eğitilen PINN modelinden elde edilen yer değiştirme, sehim ve burulma açısı tahminleri, 100 test noktasında Denklem (3), Denklem (6) ve Denklem (9) 'un analitik modelleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 5, 6 ve 7 sırasıyla eksenel uzama,

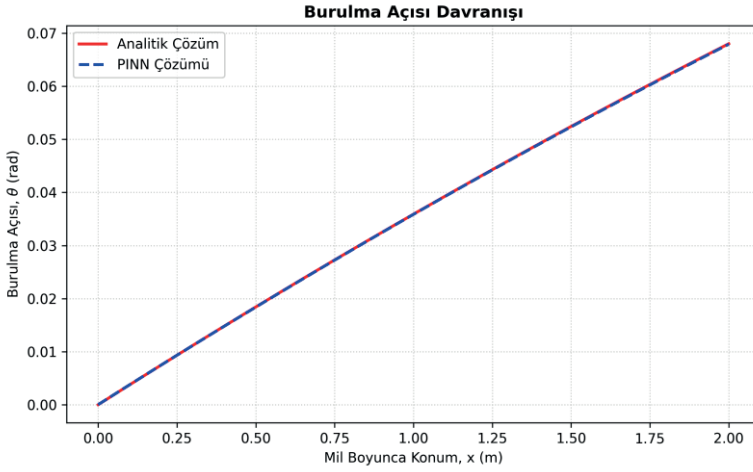
eğilme sehim ve burulma açısı dağılımlarının analitik ve PINN çözümlerinin karşılaştırmalı grafiklerini göstermektedir.



Şekil 5: Al 7075-T6 mil boyunca eksenel uzama yer değiştirmesi (Analitik vs. PINN)



Şekil 6: Al 7075-T6 mil boyunca enine sehim miktarı (Analitik vs. PINN)



Şekil 7: Al 7075-T6 mil boyunca burulma açısı dağılımı (Analitik vs. PINN)

Sayısal sonuçlar incelendiğinde, milin serbest ucundaki ($x = 2.0$ m) maksimum değerler ve L_2 'nin bağıl hataları analiz edilmiştir. Maksimum eksenel yer değiştirme miktarı analitik olarak 0.5683 mm iken, PINN modelinde 0.5677 mm olarak tahmin edilmiştir. Maksimum sehimi miktarı analitik olarak 49.2485 mm iken, PINN modeli 49.2379 mm tahmin etmiştir. Maksimum burulma açısı ise analitik 0.0680 rad iken, PINN tarafından 0.0679 rad olarak tam doğrulukla tahmin edilmiştir. İlgili L_2 hata payları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2: PINN Çözümlerinin L_2 Bağıl Hata ve Doğruluk Analizi

Deformasyon Türü	L_2 Bağıl Hata	Doğruluk Oranı (%)
Eksenel Çekme (u)	1.0181e-03	99.89819%
Eğilme Sehim (v)	2.2442e-04	99.97756%
Burulma Açısı (θ)	1.3146e-03	99.86854%

Milin en fazla gerilime maruz kalan ve tehlikeli bölümü, sabit desteğin bulunduğu $x = 0$ konumundadır. Bu bölümde, birleşik yükler nedeniyle en büyük gerilmeler dış yüzey liflerinde ($y = R, z = 0$) konumundadır. Bu noktada eksenel çekme gerilmesi (normal gerilme, σ_x) ve burulma kayma gerilmesi (τ_{xy}) bir arada etki eder.

Maksimum eğilme momenti:

$$M(0) = P \cdot L + p_0 \cdot L^2/2 = 5000 \cdot 2 + 2000 \cdot 4/2 = 14,000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Eksenel kuvvet:

$$N(0) = F + q_0 \cdot L = 150,000 + 10,000 \cdot 2 = 170,000 \text{ N}$$

Tork:

$$T(0) = T + t_0 \cdot L = 8,000 + 1,000 \cdot 2 = 10,000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Bu yüklerin oluşturduğu gerilmeler:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{eksenel}} &= N(0)/A = 170,000/(7.854 \times 10^{-3}) = 21.64 \text{ MPa} \\ \sigma_{\text{eğilme}} &= M(0) \cdot R/I = 14,000 \cdot 0.05/(4.909 \times 10^{-6}) = 142.60 \text{ MPa} \\ \sigma_{x,\text{max}} &= 21.64 + 142.60 = 164.24 \text{ MPa} \\ \tau_{\text{max}} &= T(0) \cdot R/J = 10,000 \cdot 0.05/(9.818 \times 10^{-6}) = 50.93 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Von Mises eşdeğer gerilme ilişkisi Denklem (19) ile tanımlanmaktadır:

$$\sigma_{\text{vm}} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (19)$$

Denklem (19) kullanılarak gerilmeler yerine konulduğunda Von Mises eşdeğer gerilmesi şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{vm}} &= \sqrt{164.24^2 + 3 \cdot (50.93)^2} = \sqrt{26974.78 + 7781.56} = \sqrt{34756.34} \\ &= 186.43 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Elde edilen maksimum Von Mises gerilimi (186.43 MPa), Alüminyum 7075-T6 alaşımının akma dayanımının (503 MPa) oldukça altındadır. Bu nedenle, milin elastik sınırlar içerisinde kaldığı ve güvenilir bir şekilde çalışacağı matematiksel olarak kanıtlanmıştır. Bu durum hem analitik teoriyi hem de fizik yasalarını tam olarak öğrenen PINN modeliyle tam bir uyum içinde doğrulanmıştır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Alüminyum 7075-T6 alaşımından imal edilmiş yapısal bir milin birleşik yük altındaki statik davranışı Fizik Bilgili Yapay Sinir Ağları (PINN) kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1. PyTorch kullanılarak geliştirilen PINN modeli, analitik yöntemlere kıyasla yaklaşık 10^{-5} 'lik bir bağıl hata ile çalışarak birleşik yük analizlerinde yüksek doğruluk elde etmiştir.
2. Girdi ve çıktıların normalleştirilmesi, katı mekaniğinde PINN modellerinin yakınsama hızını ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır.
3. Kritik ankastre mesnet noktasında hesaplanan Von Mises eşdeğer gerilimi (186.43 MPa) ile malzemenin elastik sınırları içinde güvenilir bir şekilde çalıştığını doğrulamıştır.

Gelecekteki çalışmalarda, bu yaklaşım malzemenin plastik deformasyon bölgesine, anizotropik kompozit yapılara ve dinamik yükler altındaki yorulma analizlerine genişletilebilir.

Kaynaklar

- Beer, F. P., Johnston, E. R., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2020). *Mechanics of Materials* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Karniadakis, G. E., Mao, Z., Wang, Z., & Zhang, D. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422-440.
- Haghighat, E., Raissi, M., & Juanes, R. (2021). Physics-informed neural networks for elasticity and elasto-plasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 376, 113602.
- Lu, L., Meng, X., Mao, Z., & Karniadakis, G. E. (2021). DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations. *SIAM Review*, 63(1), 208-228.
- ASM International. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2). ASM Handbook.



SET ÜSTÜ OCAKLARINDA IŞINIM VE TAŞINIMLA ISI GEÇİŞİNDE VERİM ARTIŞI VE TASARRUF İÇİN APARAT GELİŞTİRİLMESİ

“ ”

Rabi Karaali¹

Enes Akçay²

Arzu Keven³

¹ İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü , Türkiye (ORCID: 0000-0002-2193-3411) rabikar@gmail.com

² Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü , Türkiye (orcid: 0000-0001-9665-8787) enes_akcay.61@outlook.com

³ Kocaeli Üniversitesi Gölçük MYO, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0003-0040-9167) arzu.keven@kocaeli.edu.tr

GİRİŞ

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 3988 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Enerji talebindeki hızlı artış ve fosil yakıt rezervlerinin tükenme tehlikesi, küresel ölçekte enerji verimliliği politikalarının yeniden şekillenmesine neden olmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporlarına göre, konut sektörü dünya genelindeki toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30'undan sorumludur [1]. Bu tüketim kalemleri arasında ısıtma ve soğutmadan sonra en büyük payı pişirme faaliyetleri almaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde evsel enerjinin önemli bir kısmının pişirme eylemi için harcandığı ve bu süreçteki verimsizliğin karbon emisyonlarını doğrudan artırdığı bilinmektedir [2]. Bu bağlamda, pişirici cihazların termodinamik verimliliğinin artırılması, küresel sürdürülebilirlik hedefleri için kritik bir adımdır.

Günümüzde evsel pişirme teknolojileri temel olarak gaz yakıtlı (LPG, Doğalgaz) ve elektrik dirençli (rezistanslı) sistemler olmak üzere iki ana kategoride toplanmaktadır. Ancak termodinamik açıdan incelendiğinde, her iki sistemin de önemli verimsizliklere sahip olduğu görülmektedir. Oberascher ve arkadaşları [3] tarafından yapılan kapsamlı çalışmada; induksiyonlu ocakların verimi %84, cam seramik elektrikli ocakların verimi %74 seviyesindeyken, geleneksel gazlı ocakların veriminin %50-55 bandında kaldığı raporlanmıştır. Elektrikli ocaklarda joule ısıtma prensibiyle üretilen enerjinin önemli bir kısmı, tencere yerine cihaz gövdesine iletim (conduction) veya çevreye taşınım (convection) yoluyla kaybedilmektedir [4]. Literatürde gazlı ocakların performansını artırmaya yönelik çalışmalar, genellikle brülör geometrisinin optimizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır. Jugjai ve Rungsimuntuchart [5], ısı geri kazanımlı (heat-recirculating) brülör tasarımları kullanarak yanma verimini artırmayı denemişlerdir. Benzer şekilde, Hou ve Ko [6], tencere tabanı ile brülör çıkışı arasındaki mesafenin (loading height) ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini incelemiş ve alevin tencere tabanına çarpma (impingement) karakteristiğinin kritik önem taşıdığını vurgulamışlardır. Yanma havası giriş açıklığı ve brülör yüklenme yüksekliğinin ısı verim üzerindeki birleşik etkisini inceleyen güncel çalışmalarda ise, geometrik parametrelerin alev kararlılığını ve ısı transfer yüzey alanını doğrudan değiştirdiği kanıtlanmıştır [7].

Elektrikli ocak tarafında ise problem, daha çok ısı yalıtımı ve termal köprülerin engellenmesi ile ilgilidir. Isıtıcı elemandan yayılan ısınn pişirme kabına yönlendirilmesi sırasında radyasyon kayıpları önemli bir yer tutar. Villacis ve arkadaşları [4], rezistanslı ocaklarda termal atalet (thermal inertia) etkisinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bir sistemin ısıl kütesinin artması, özellikle kısa süreli pişirme işlemlerinde enerjinin tencere yerine

kalkanı veya gövdeyi ısıtmaya harcanmasına neden olabilmektedir. Isı transferi temellerine göre [8, 9], yalıtım malzemesi kalınlığının optimum bir noktası vardır; gereğinden fazla yalıtım, sistemin ısınma süresini uzatarak verimi düşürebilir. Piyasada bulunan ticari ürünlerin birçoğu, bu termodinamik denge gözetilmeden tasarlandığından, cihaz gövdesinden çevreye olan kayıplar (casing losses) kabul edilebilir sınırların üzerindedir.

Bu çalışmanın özgün değeri, literatürdeki karmaşık ve maliyetli yöntemlerin aksine, mevcut konvansiyonel ocaklara uygulanabilecek basit geometrik modifikasyonların ve pasif yalıtım stratejilerinin etkinliğini deneysel olarak ortaya koymasındır. Çalışma kapsamında şu temel hedeflere odaklanılmıştır:

MATERYAL METOD

Bu çalışmada, elektrikli ve gazlı ev tipi ocaklarda meydana gelen ısı kayıplarının azaltılması ve ısı verimin artırılmasına yönelik deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Deneyler, farklı yalıtım uygulamaları ve geliştirilen aparatların ısı transferi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kontrollü koşullar altında yürütülmüştür. Deneysel çalışmalarda standart ev tipi elektrikli ocak ve gazlı ocak kullanılmıştır. Isıtma deneylerinde 17 cm çapında paslanmaz çelik tencere içerisine 1 litre su konularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Su sıcaklığının ölçümünde dijital termometre ve veri kayıt sistemi kullanılmıştır. Yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla termal kamera ile görüntüleme yapılmıştır.

Yalıtım uygulamalarında 5 mm, 10 mm ve 15 mm kalınlıklarında cam yünü esaslı yalıtım malzemeleri tercih edilmiştir. Ayrıca 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm kalınlıklarında çelik sac levhalar kullanılarak farklı deney düzenekleri oluşturulmuştur. Gazlı ocak deneylerinde ise farklı çap ve hava giriş açıklıklarına sahip metal aparat parçalarından yararlanılmıştır.

Tüm deneylerde aynı tencere, aynı su miktarı ve benzer ortam koşulları kullanılarak ölçüm hatalarının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Deneyler, hava akımının sınırlı olduğu kapalı bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Ocaklar düz bir yüzey üzerine yerleştirilmiş ve her deney öncesinde sistemin ortam sıcaklığına gelmesi beklenmiştir.

Tencere, her deneyde ocağın merkezine yerleştirilmiş ve içine 1 litre su konulmuştur. Başlangıç su sıcaklığı ortam sıcaklığına eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçüm cihazlarının çalışır durumda olduğu kontrol edildikten sonra deneylere başlanmıştır.

Elektrikli ocak deneylerinde tencere çevresine farklı kalınlıklarda sac ve yalıtım malzemeleri uygulanmıştır. Gazlı ocak deneylerinde ise tencere altına yerleştirilen aparatların çapı, kalınlığı ve hava giriş açıklıkları değiştirilerek farklı deney koşulları oluşturulmuştur.

Her deneyde önce tencere içerisine 1 litre su doldurulmuş ve başlangıç sıcaklığı yaklaşık 20 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra ocak maksimum güç seviyesinde çalıştırılmış ve aynı anda kronometre başlatılmıştır. Deney süresince su sıcaklığı belirli zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Su sıcaklığı 80 °C'ye ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Her deneyden sonra sistem kapatılarak ortam sıcaklığına gelmesi beklenmiş ve bir sonraki ölçüme geçilmiştir.

Deneylerin güvenilirliğini artırmak amacıyla her ölçüm en az üç kez tekrarlanmış, elde edilen değerlerin ortalaması değerlendirmelerde kullanılmıştır.

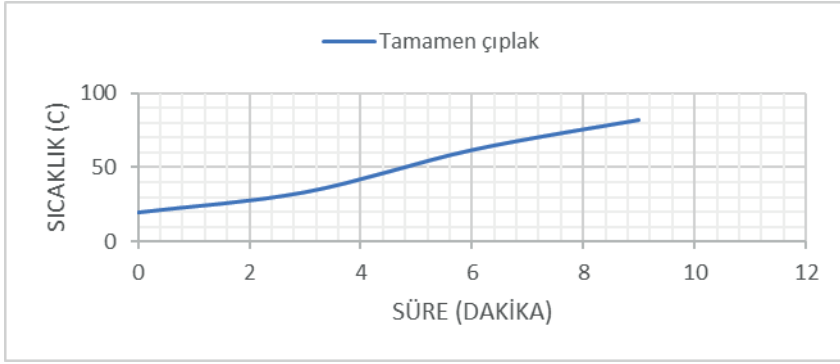
Elektrikli ocaklarda üç farklı uygulama yöntemi denenmiştir. Bunlar; yalnızca çelik sac kullanımı, çelik sac ile birlikte yalıtım uygulanması ve sadece yalıtım malzemesi kullanılmasıdır. Yalıtım malzemeleri tencere etrafına düzenli biçimde yerleştirilmiş ve boşluk oluşmamasına dikkat edilmiştir. Gazlı ocak deneylerinde ise 13 cm, 14 cm ve 15 cm çaplarında aparat plakaları kullanılmıştır. Aparat kalınlıkları 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm olarak seçilmiş; hava giriş açıklıkları ise 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm olarak değiştirilmiştir. Bu sayede geometrik parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen sıcaklık-zaman verileri grafik haline getirilmiştir. Her deney koşulu için suyun 20 °C'den 80 °C'ye ulaşma süresi temel performans ölçütü olarak kabul edilmiştir. Farklı uygulamalar arasında karşılaştırmalar yapılarak yalıtım kalınlığı, sac kullanımı ve aparat geometrisinin sistem verimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar grafikler yardımıyla sunulmuştur.

BULGULAR

ELEKTRİKLİ OCAKTA YAPILABİLCEK ISI TASARRUFLARI

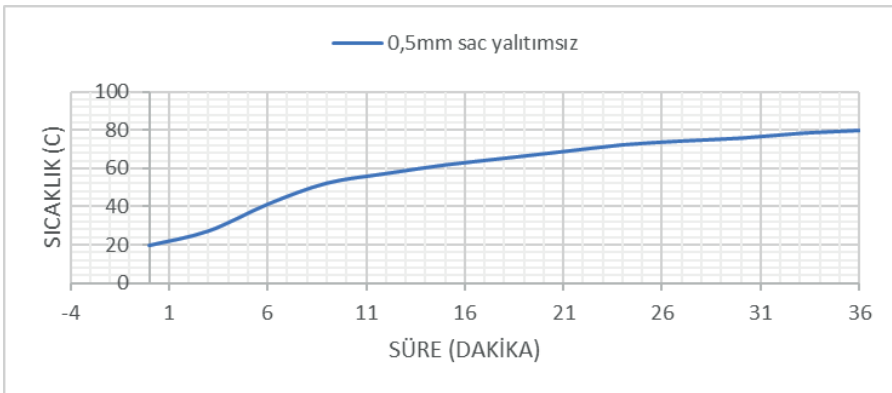
Elektrikli ocak ile yapılan deney ve incelemelerden önce tamamen çıplak yani orijinal hali ile 17 cm çapındaki çelik tencereye bir litre su konularak ölçüm yapılmıştır. İlgili eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



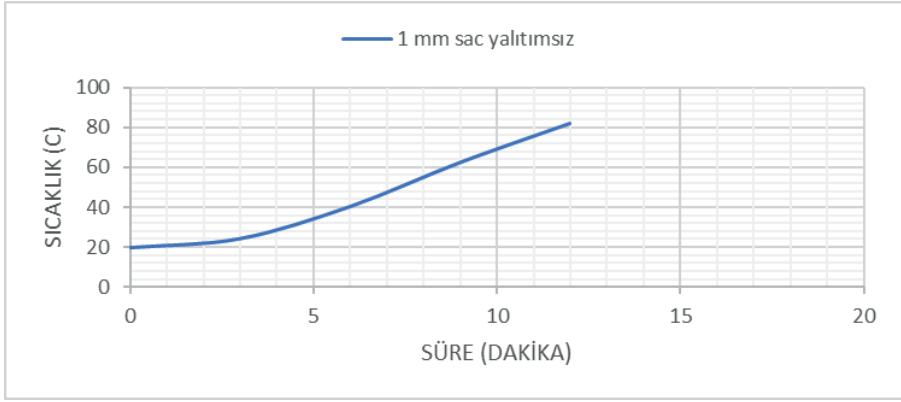
Şekil 1. Tamamen çıplak yani orijinal hali ile 17 cm çapındaki çelik tencereye bir litre su konularak yapılan ölçüm sonucu elde edilen eğri.

Şekil 1’de tamamen çıplak yani orijinal hali ile 17 cm çapındaki çelik tencereye bir litre su konularak yapılan ölçüm sonucu elde edilen eğriden görüldüğü gibi eğri önce üçüncü dakikaya kadar hafif yatay sonra altıncı dakikaya dikey sonra da dokuzuncu dakikaya kadar hafif yatay seyretmektedir. İlk üç dakikada suya geçecek ısıyı cihazın çelik sac kabı ve tencere çeliği paylaşmakta, üç ve altıncı dakikalar arası suya daha hızlı ısı geçmektedir. Altıncı dakikadan sonra tencere ve elektrikli cihazın kabından çevreye ısı kaybı artmaktadır.

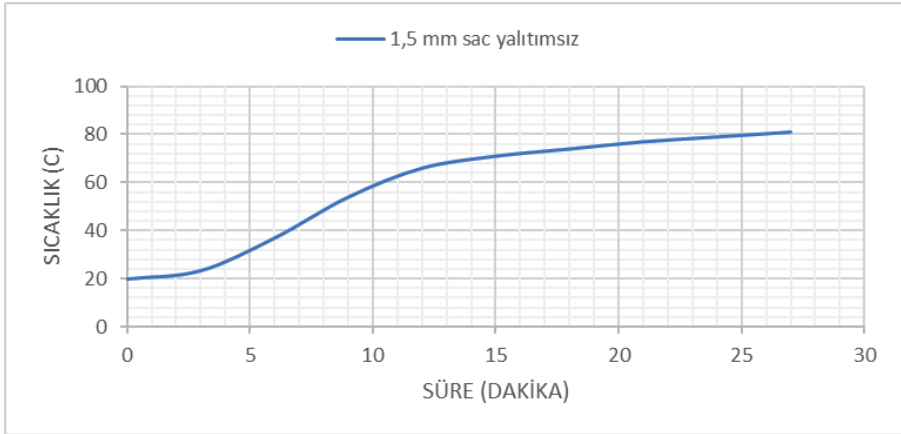
Şekil 2’de ve 3’te altıncı dakikadan sonra tencere ve elektrikli cihazın kabından çevreye olan ısı kaybı görülmektedir. Elektrikli cihazın kabı yalıtılmamış olup çelik sac emaye ile kaplanmıştır. Aslında cihazın çelik sacdan yapılmış kabının alttan ve üstten uygun bir şekilde yalıtılmış olması gerekmektedir.



Şekil 2. Çelik tencere etrafının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.



Şekil 3. Çelik tencere etrafının 1 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.



Şekil 4. Çelik tencere etrafının 1,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.

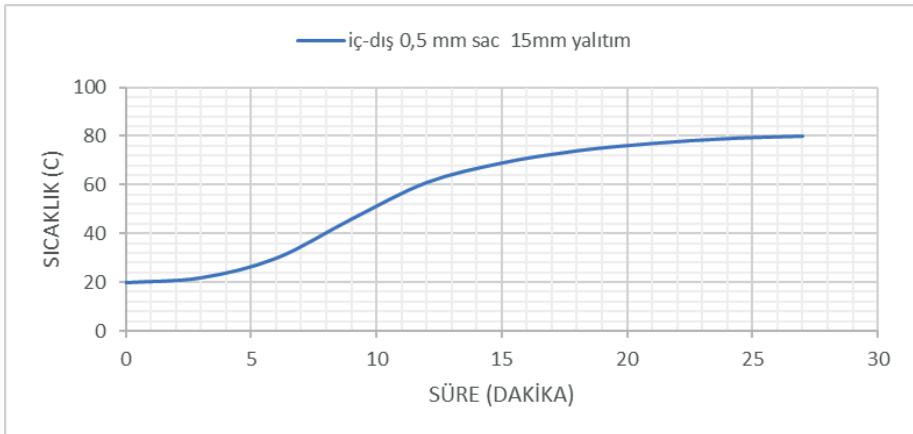
Şekil 2, Şekil 3, ve Şekil 4’de çelik tencere etrafının 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm çelik sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişim eğrileri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C’den 80 °C’ye 0,5 mm çelik sacda 36 dakikada, 1 mm çelik sacda 12 dakikada ve 1,5 mm çelik sacda 25 dakikada çıkmaktadır. 1 mm çelik sacda performans en iyidir.



Şekil 5. Çelik tencere etrafının 5mm yalıtımın iç ve dışının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.

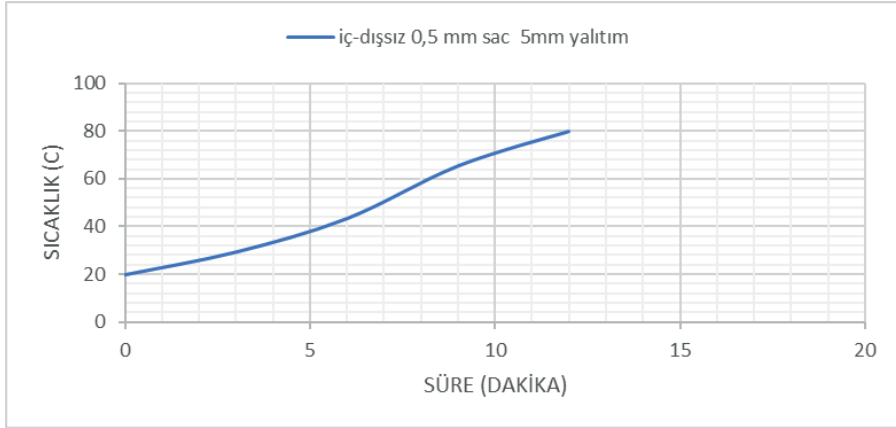


Şekil 6. Çelik tencere etrafının 10 mm yalıtımın iç ve dışının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.

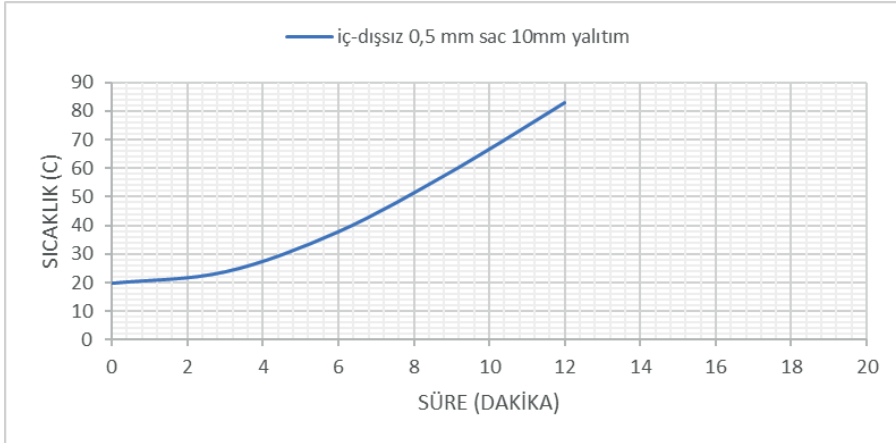


Şekil 7. Çelik tencere etrafının 15 mm yalıtımın iç ve dışının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.

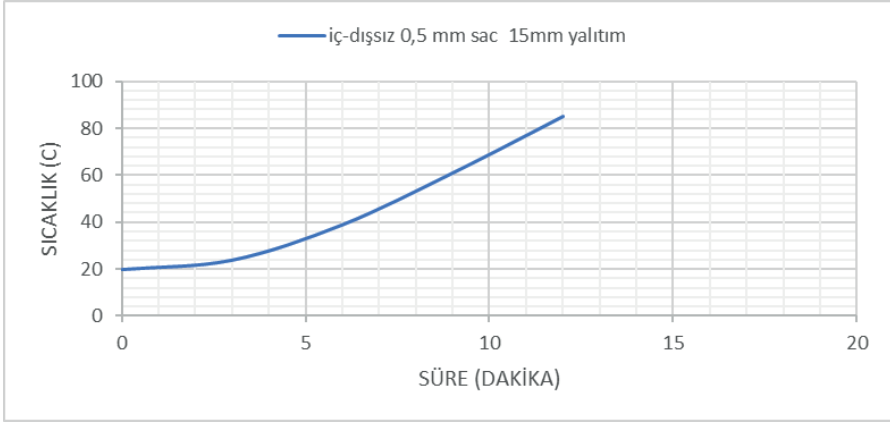
Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de çelik tencere etrafının 5 mm, 10 mm ve 15 mm yalıtımın iç ve dışının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C’den 80 °C’ye 0,5 mm çelik sacda 5 mm yalıtımda 24 dakikada, 0,5 mm çelik sacda 10 mm yalıtımda 21 dakikada ve 0,5 mm çelik sacda 15 mm yalıtımda 27 dakikada çıkmaktadır. 0,5 mm çelik sacda 10 mm yalıtımda performans en iyidir.



Şekil 8. Çelik tencere etrafının 5 mm yalıtımın iç tarafının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.



Şekil 9. Çelik tencere etrafının 10 mm yalıtımın iç tarafının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.

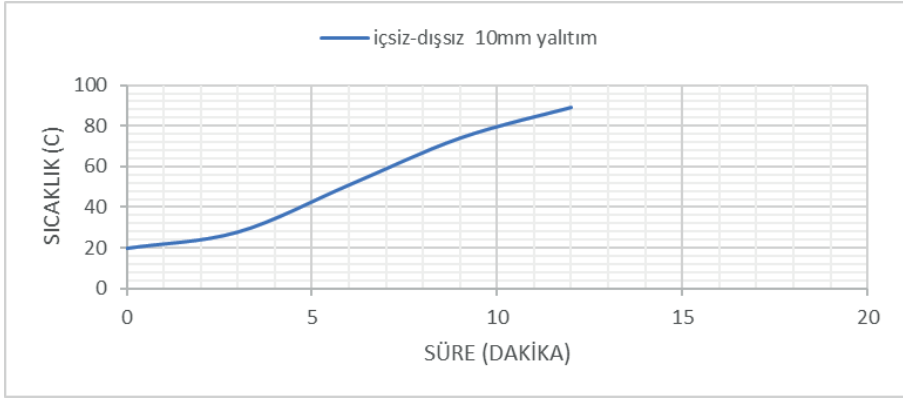


Şekil 10. Çelik tencere etrafının 15 mm yalıtımın iç tarafının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.

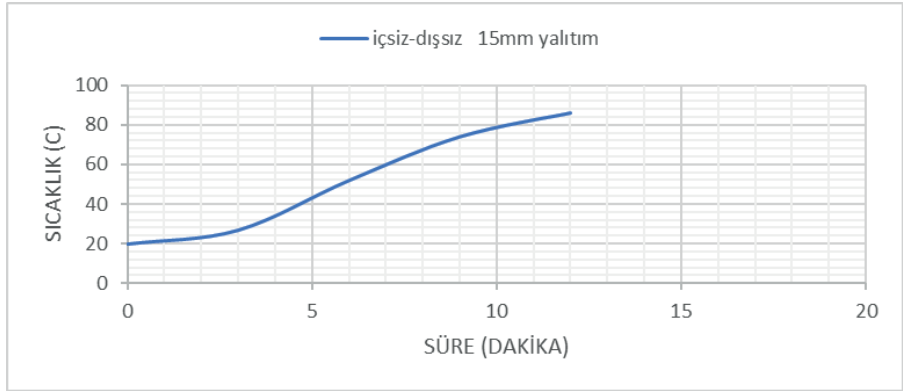
Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da çelik tencere etrafının 5 mm, 10 mm ve 15 mm yalıtımın iç tarafının 0,5 mm sac yuvarlak levha ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye 5 mm yalıtımda 12 dakikada, 10 mm yalıtımda 11,5 dakikada ve 15 mm yalıtımda 11,2 dakikada çıkmaktadır. Yalıtımın iç tarafının 0,5 mm çelik sacda 15 mm yalıtımda performans en iyidir.



Şekil 11. Çelik tencere etrafının sac yuvarlak levha kullanmadan 5 mm yalıtım ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.



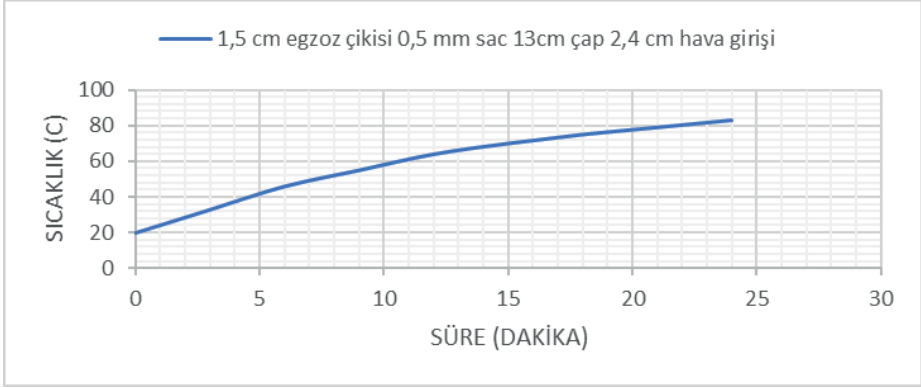
Şekil 12. Çelik tencere etrafının sac yuvarlak levha kullanmadan 10 mm yalıtım ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi.



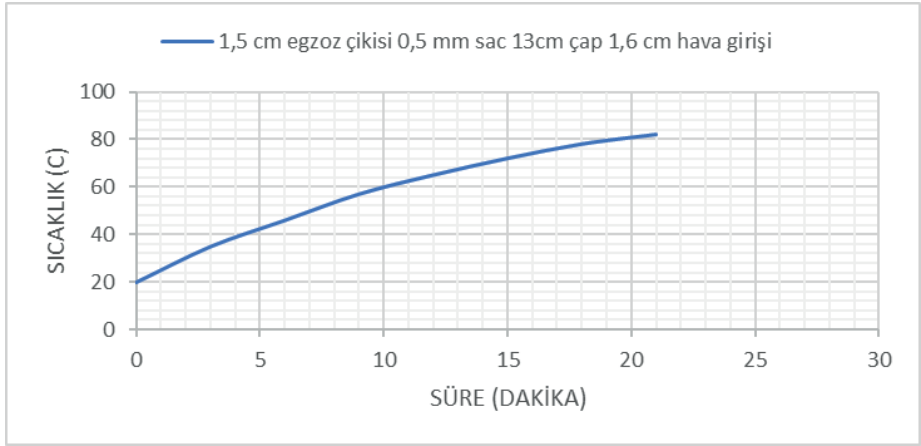
Şekil 13. Çelik tencere etrafının sac yuvarlak levha kullanmadan 15 mm yalıtım ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimi. Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te çelik tencere etrafının sac yuvarlak levha kullanmadan 5 mm, 10 mm ve 15 mm yalıtım ile kapatılmasında sıcaklık süre değişimleri verilmiştir.

Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye 5 mm yalıtımda 8,7 dakikada, 10 mm yalıtımda 10 dakikada ve 15 mm yalıtımda 10,5 dakikada çıkmaktadır. Yalıtımda 5 mm yalıtımın en iyi performansını vermektedir.

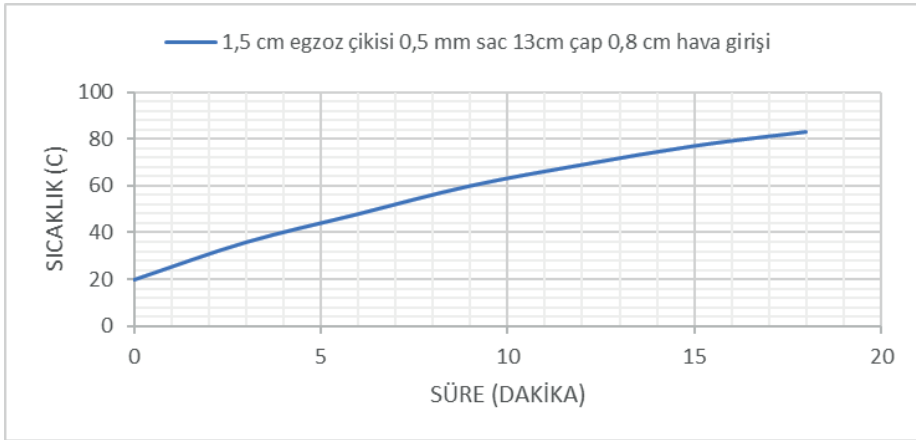
GAZLI OCAKTA YAPILABİLCEK ISI TASARRUFLARI VE UYGUN APARAT GELİŞTİRİLMESİ



Şekil 14. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 0,5 mm kalınlığında sac 13 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

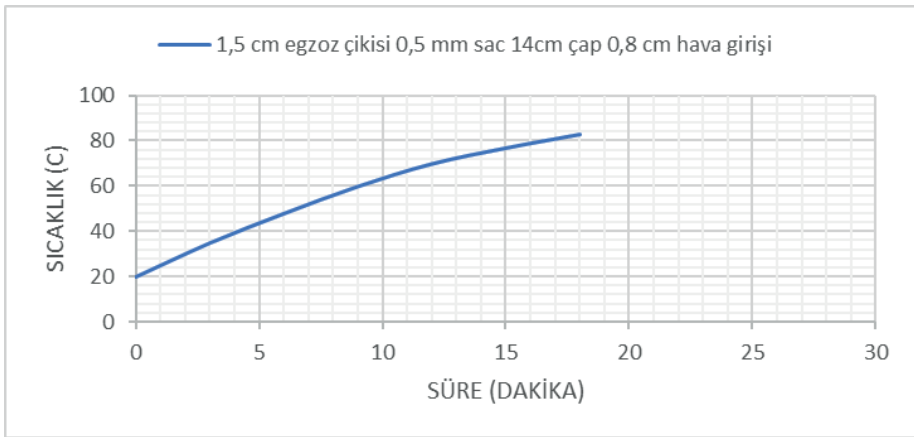


Şekil 15. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 13cm çap 1,6 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

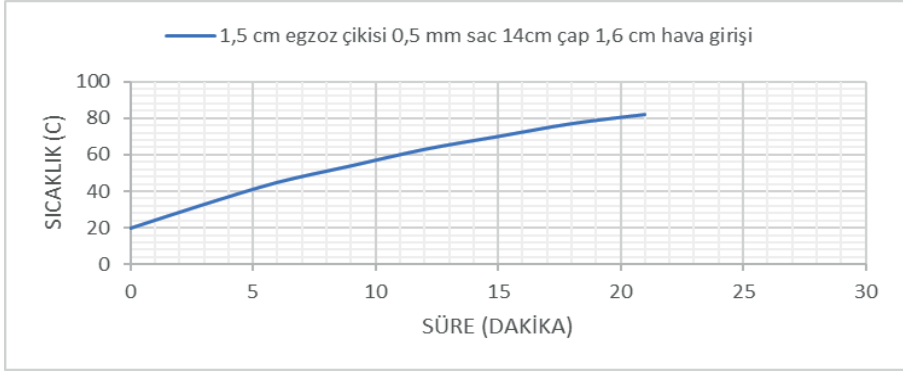


Şekil 16 Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 13cm çap 0,8 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

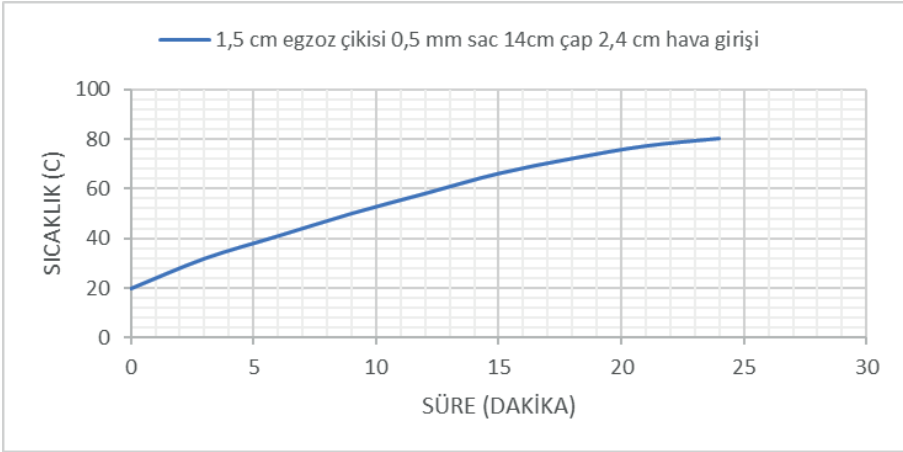
Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 0,5 mm kalınlığında sac, 13 cm çap, 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye hava girişi 0,8 cm'de 16,5 dakikada, 1,6 cm'de 19,5 dakikada ve 2,4 cm'de 22 dakikada çıkmaktadır. Hava girişi 0,8 cm'de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 17. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 14 cm çap 0,8 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

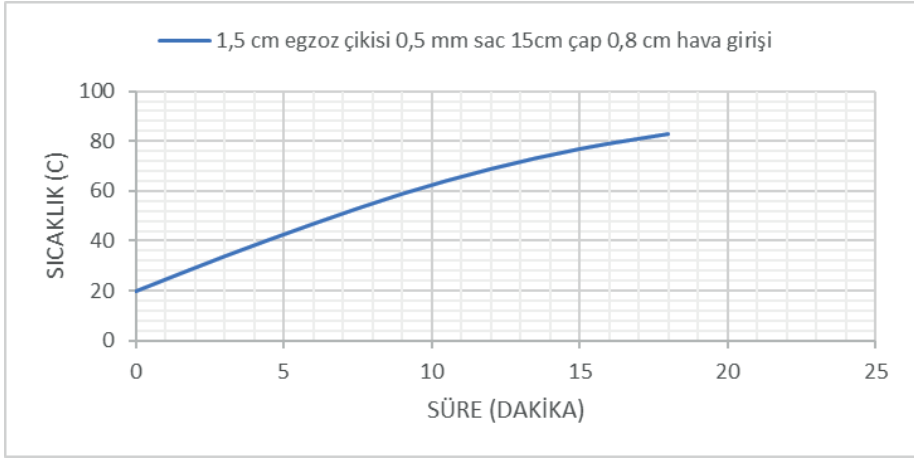


Şekil 18. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 14 cm çap 1,6 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

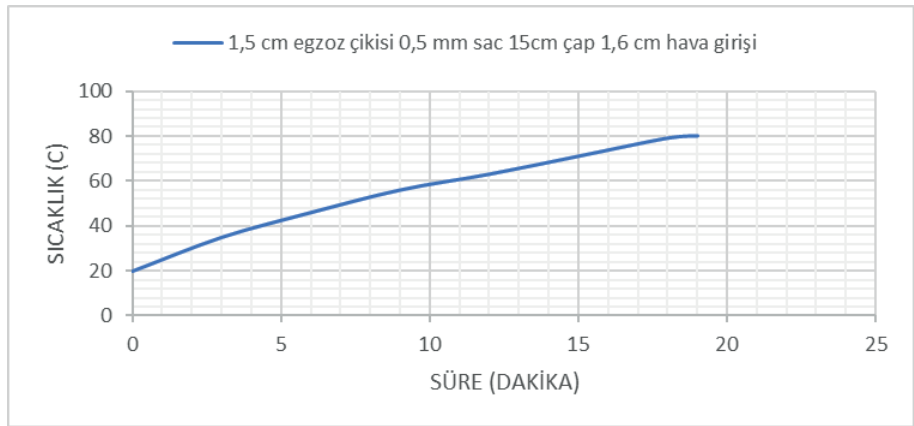


Şekil 19. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz Çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 14 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

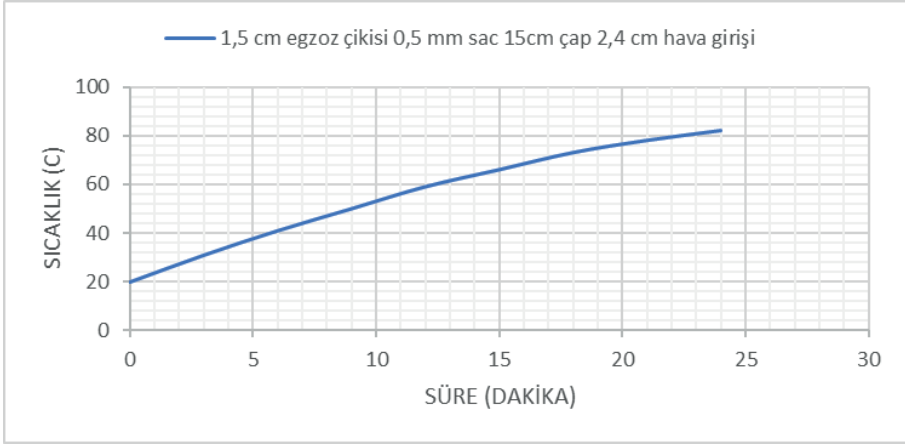
Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 2+19'da çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 0,5 mm kalınlığında sac, 14 cm çap, 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye hava girişi 0,8 cm'de 16,5 dakikada, 1,6 cm'de 19,5 dakikada ve 2,4 cm'de 24 dakikada çıkmaktadır. Hava girişi 0,8 cm'de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 20. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 15 cm çap 0,8 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

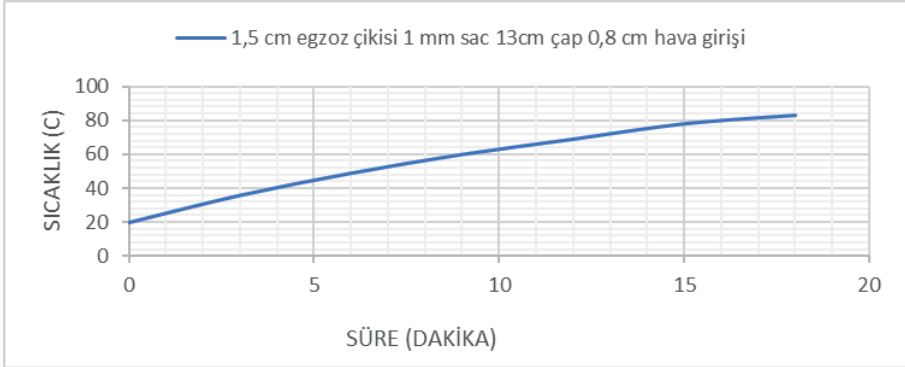


Şekil 21. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 15 cm çap 1,6 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

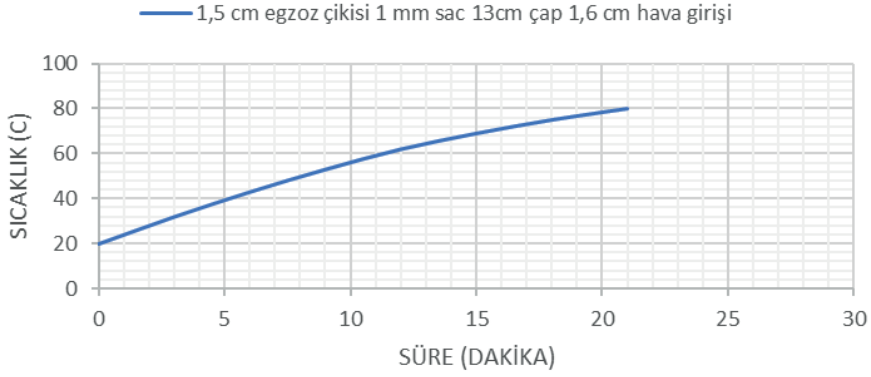


Şekil 22. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 0,5 mm kalınlığında sac 15 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

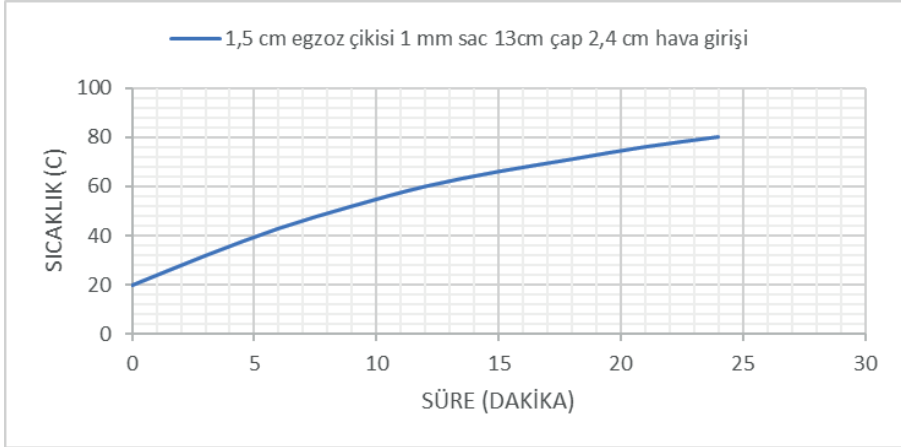
Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22’de çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 0,5 mm kalınlığında sac, 15 cm çap, 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C’den 80 °C’ye hava girişi 0,8 cm’de 16,5 dakikada, 1,6 cm’de 19 dakikada ve 2,4 cm’de 22,5 dakikada çıkmaktadır. Hava girişi 0,8 cm’de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 23. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 13 cm çap 0,8 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

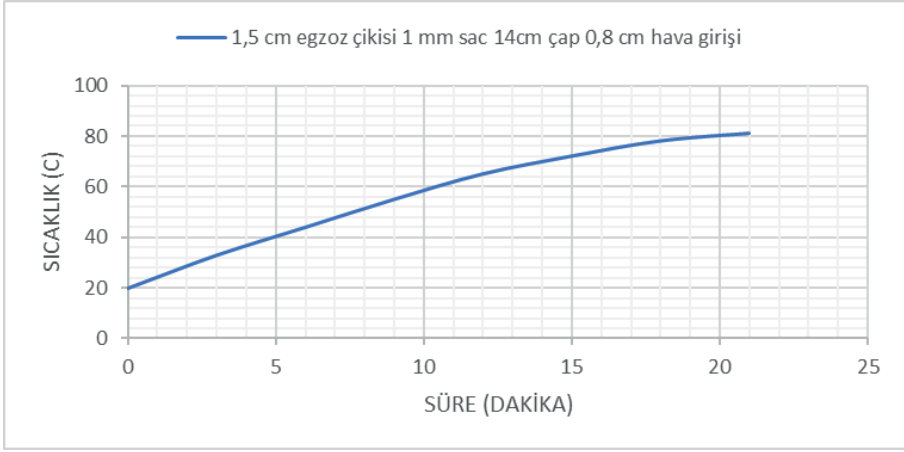


Şekil 24. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 13 cm çap 1,6 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

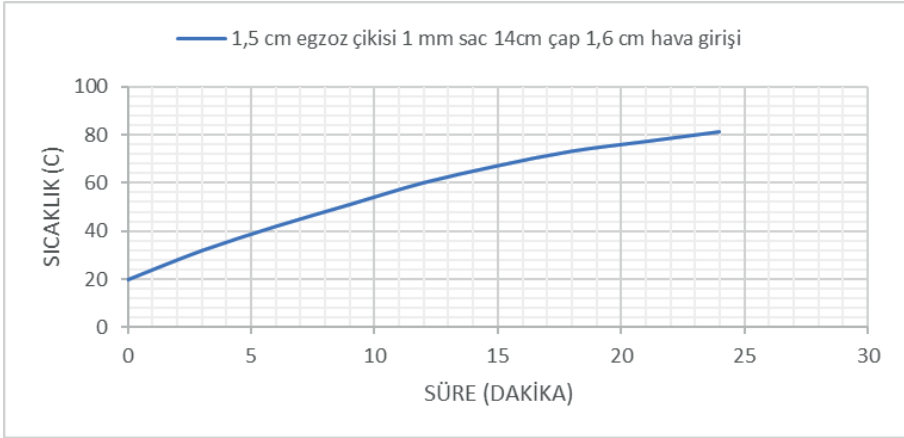


Şekil 25. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 13 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

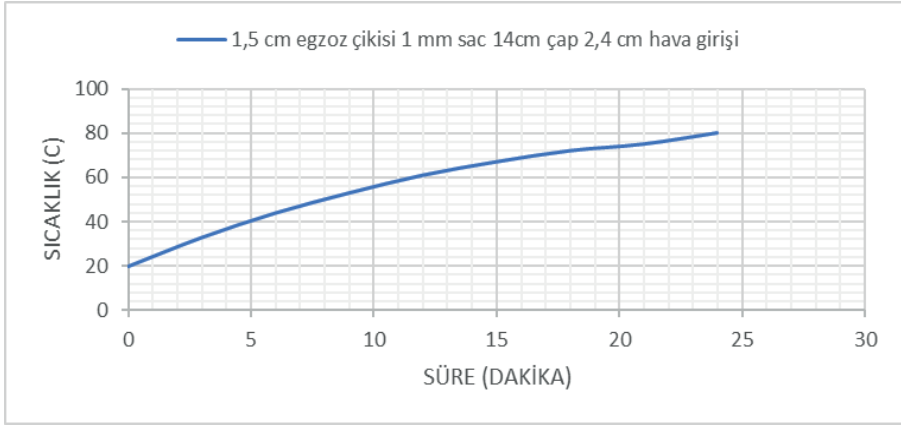
Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25'te çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 1 mm kalınlığında sac, 13 cm çap, 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye hava girişi 0,8 cm'de 16,3 dakikada, 1,6 cm'de 21 dakikada ve 2,4 cm'de 24 dakikada çıkmaktadır. Hava girişi 0,8 cm'de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 26. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 14 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

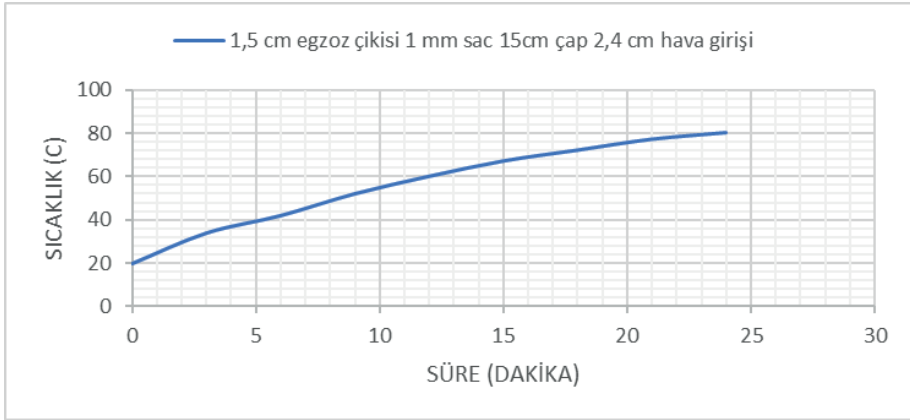


Şekil 27. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 14 cm çap 1,6 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

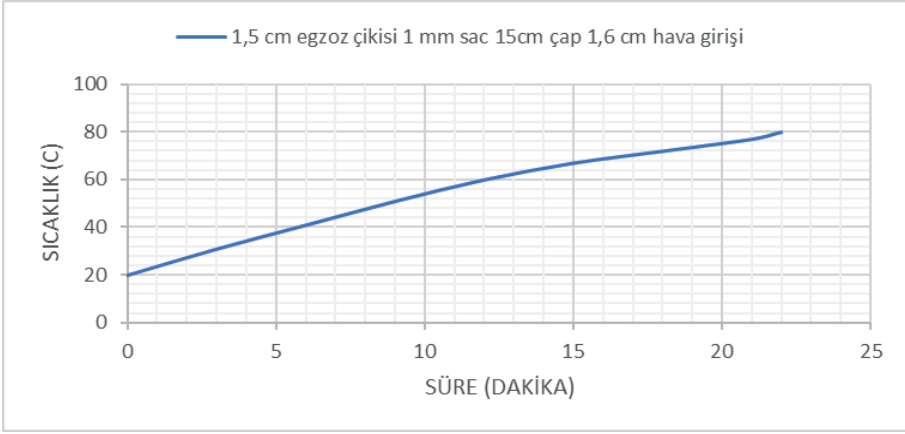


Şekil 28. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 14 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

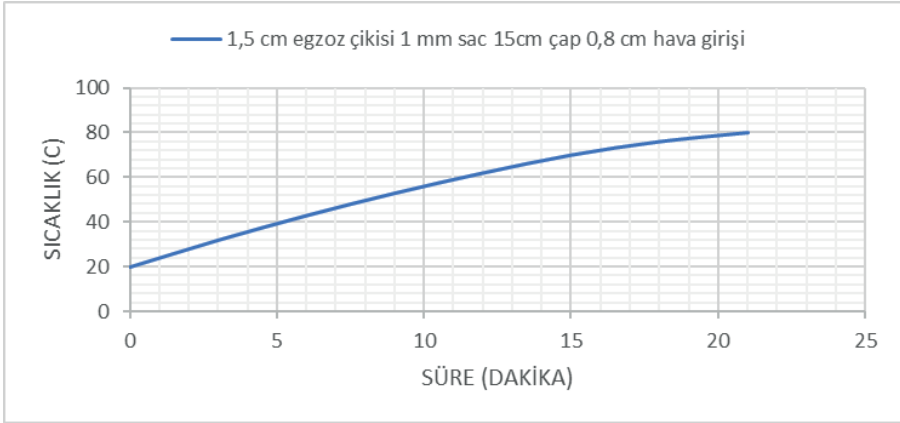
Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28'de çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 1 mm kalınlığında sac, 14 cm çap, 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye hava girişi 0,8 cm'de 20 dakikada, 1,6 cm'de 23 dakikada ve 2,4 cm'de 24 dakikada çıkmaktadır. Hava girişi 0,8 cm'de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 29. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 15 cm çap 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

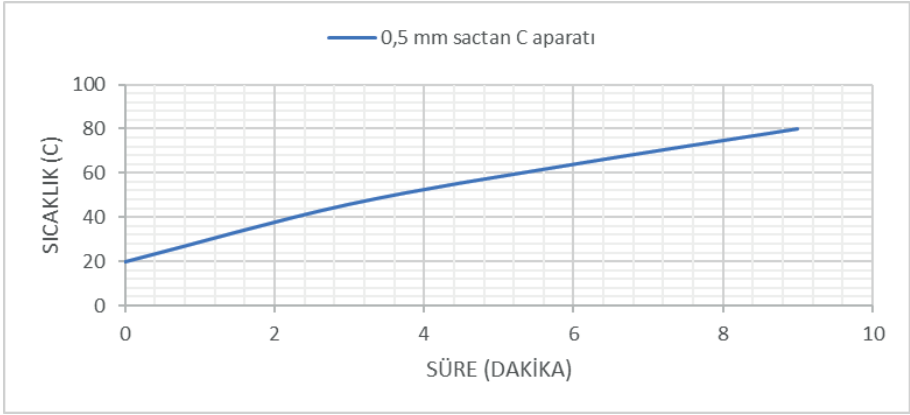


Şekil 30. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 15 cm çap 1,6 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

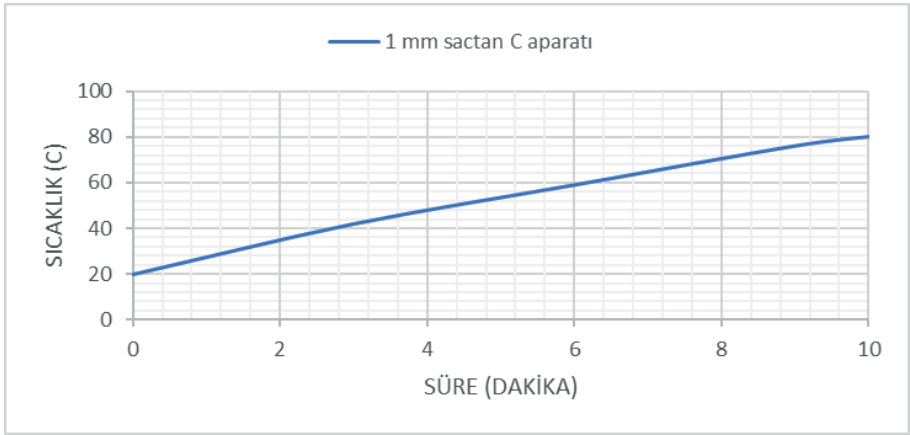


Şekil 31. Çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı 1 mm kalınlığında sac 15 cm çap 0,8 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi.

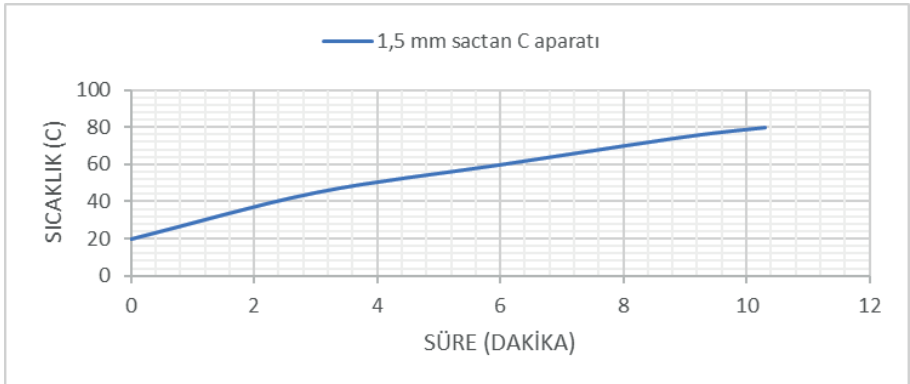
Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31'de çelik tencere altının 1,5 cm egzoz çıkışı, 1 mm kalınlığında sac, 15 cm çap, 0,8 cm, 1,6 cm ve 2,4 cm hava girişi durumunda sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20 °C'den 80 °C'ye hava girişi 0,8 cm'de 21 dakikada, 1,6 cm'de 22 dakikada ve 2,4 cm'de 24 dakikada çıkmaktadır. Hava girişi 0,8 cm'de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 32. Çelik tencerenin gazlı ocakta minimum sürede sıcaklığını 20 °C'den 80 °C'ye çıkarmak için 0,5 mm çelik sactan geliştirilmiş aparatın sıcaklık süre değişimi.



Şekil 33. Çelik tencerenin gazlı ocakta minimum sürede sıcaklığını 20 °C'den 80 °C'ye çıkarmak için 1 mm çelik sactan geliştirilmiş aparatın sıcaklık süre değişimi.

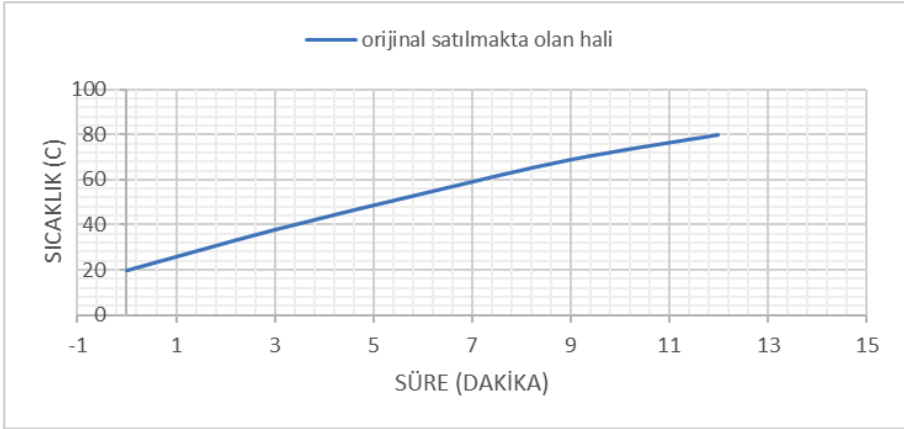


Şekil 34. Çelik tencerenin gazlı ocakta minimum sürede sıcaklığını 20 °C'den 80 °C'ye çıkarmak için 1,5 mm çelik sactan geliştirilmiş aparatın sıcaklık süre değişimi.

Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34'te çelik tencerenin gazlı ocakta minimum sürede sıcaklığını 20°C 'den 80°C 'ye çıkarmak için 0,5mm, 1mm ve 1,5 mm çelik sactan geliştirilmiş aparatın sıcaklık süre değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık 20°C 'den 80°C 'ye 0,5 mm aparatta 9 dakikada, 1,6 cm'de 10 dakikada ve 2,4 cm'de 10.3 dakikada çıkmaktadır. 0,5 mm'de en iyi performansını vermektedir.



Şekil 35. Çelik tencerenin gazlı ocakta minimum sürede sıcaklığını 20°C 'den 80°C 'ye çıkarmak için çıplak desteksiz dengesiz hal için sıcaklık süre değişimi.



Şekil 36. Çelik tencerenin orijinal satılmakta olan gazlı ocakta sıcaklığını 20°C 'den 80°C 'ye çıkarmak için sıcaklık süre değişimi.



Şekil 37. Çelik tencerenin orijinal gazlı ocaktan kapaksız durumda sıcaklığını 20 °C'den 80 °C'ye çıkarmak için sıcaklık süre değişimi.

SONUÇ

Bu çalışmada, elektrikli ve gazlı ev tipi ocaklarda meydana gelen ısı kayıpları deneysel yöntemlerle incelenmiş; basit geometrik düzenlemeler ve yalıtım uygulamaları ile ısı verimliliğinin artırılabilirliği araştırılmıştır. Deneyler kapsamında, standart bir çelik tencerede bulunan 1 litre suyun 20 °C'den 80 °C'ye ısıtılma süreleri temel performans kriteri olarak alınmıştır.

Elektrikli ocaklar üzerinde yapılan deneylerde, cihaz gövdesinden çevreye önemli miktarda ısı kaybı olduğu termal kamera görüntüleri ile açıkça ortaya konmuştur. Farklı kalınlıklardaki metal levhalar ve yalıtım malzemeleri ile yapılan uygulamalar sonucunda, en iyi performansın sac levha kullanılmadan doğrudan 5 mm yalıtım uygulanması durumunda elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumda, suyun 80 °C'ye ulaşma süresi 8,7 dakikaya kadar düşmüştür. Daha kalın yalıtım uygulamalarının ise sistemin termal ataletini artırarak ısınma süresini uzattığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, elektrikli ocaklarda optimum yalıtım kalınlığının kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Gazlı ocaklar üzerinde gerçekleştirilen deneylerde ise, yanma havası giriş açıklığı, aparat çapı ve sac kalınlığının ısı transferi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, hava giriş açıklığının 0,8 cm olduğu durumlarda en kısa ısınma sürelerinin elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, piyasada kullanılan standart ızgaraların ve destek aparatlarının kaldırılmasıyla alev-tencere etkileşiminin arttığı ve ısı kayıplarının azaldığı belirlenmiştir. Desteksiz ve çıplak durumda yapılan deneylerde, ısınma süresi 9 dakikaya kadar düşürülmüştür. Geliştirilen 0,5 mm kalınlığındaki çelik aparat ile de benzer şekilde yüksek verim elde edilmiştir.

Her iki ocak türü için yapılan deneyler değerlendirildiğinde, basit yapısal düzenlemeler ve düşük maliyetli yalıtım uygulamalarıyla pişirme sürelerinde iyileşme sağlanabileceği ortaya konmuştur. Bu durum hem enerji tüketiminin azaltılması hem de kullanıcı konforunun artırılması açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, mevcut konvansiyonel elektrikli ve gazlı ocakların karmaşık ve yüksek maliyetli sistemlere ihtiyaç duyulmadan daha verimli hale getirilebileceğini göstermektedir. Geliştirilen yöntemler, hane halkı tarafından kolaylıkla uygulanabilecek nitelikte olup, ülke genelinde yaygınlaştırılması durumunda önemli ölçüde enerji tasarrufu potansiyeli sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, farklı tencere malzemelerinin, farklı pişirme yüklerinin ve uzun süreli kullanım koşullarının sistem performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, geliştirilen aparatların endüstriyel tasarıma uygun hale getirilerek seri üretime uyarlanması, uygulamaya yönelik önemli bir adım olacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency, Paris.
- [2] Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Majid, M. Z. A. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843-862.
- [3] Oberascher, C., Stamminger, R., & Pakula, C. (2011). Energy efficiency in daily food preparation. *International Journal of Consumer Studies*, 35(2), 201-211.
- [4] Villacis, S., Naranjo-Mendoza, C., & Pico, R. (2018). Energy efficiency analysis of induction versus electric resistance cooktops. *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*.
- [5] Jugjai, S., & Rungsimuntuchart, N. (2002). High efficiency heat-recirculating domestic gas burners. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(6-7), 581-592.
- [6] Hou, Shuhn-Shyurng & Ko, Yung-Chang. (2005). Influence of oblique angle and heating height on flame structure, temperature field and efficiency of an impinging laminar jet flame. *Energy Conversion and Management*. 46. 941-958. 10.1016/j.enconman.2004.06.001.
- [7] Yadav, Dhananjay. (2020). Performance Analysis of LPG Cook Stoves with Modifications. 10.1007/978-981-15-0124-1_82.
- [8] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. John Wiley & Sons.
- [9] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education.
- [10] Jugjai, S. & Tia, Sarni & Trewetaskorn, W.. (2001). Thermal efficiency improvement of an LPG gas cooker by a swirling central flame. *International Journal of Energy Research*. 25. 657-674. 10.1002/er.708.



TEPSİLİ BİR KURUTUCUDA
DEVECİ VE SANTA MARIA ARMUT
DİLİMLERİNİN KURUTMA
PERFORMANSLARI VE ENERJİ
EKSERJİ ANALİZİ

“ ”

Rabi KARAALİ¹

Arzu KEVEN²

Canan CIMSİT³

1 İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Me-
katronik Mühendisliği Bölümü , Türkiye (ORCID: 0000-0002-2193-3411)
rabikar@gmail.com

2 Kocaeli Üniversitesi Gölçük MYO, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0003-0040-9167)
arzu.keven@kocaeli.edu.tr

3 Kocaeli Üniversitesi Gölçük MYO, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-3222-1735)
ccimsit@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Çalışmamızda deveci ve santa maria armutlarının kurutma performansları incelenmiş ve enerji-ekserji analizleri yapılmıştır. Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 3888 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Dünyada enerji talebindeki artış, sınırlı fosil kaynaklar ve çevre kirliliği gibi faktörler nedeniyle temiz ve verimli enerjinin önemini artırmış ve dikkatleri üzerine çekmiştir. Gıdaları muhafaza etmenin en eski ve en iyi yöntemlerinden biri kurutma işlemidir. Bu işlem temel olarak ısı enerjisini kullanarak katı gıdadaki nemin uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Gıda kurutma işleme tesislerinde gıdanın nem içeriğini azaltmak amacıyla yapılan işlemlerde akışkan yataklı, kesikli, tepsili ve güneş enerjisiyle kurutma yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. İşlemin temel amaçları su aktivitesinin azaltılması, bozulmanın önlenmesi ve gıdanın hacim ve ağırlığının en aza indirilmesi olarak vurgulanabilir. Bu yönüyle kurutma işlemi tarım alanları için raf ömrünü uzatması, paketleme maliyetini düşürmesi, lezzetini ve besin değerini koruması nedeniyle bir zorunluluktur.

Kurutma işlemi bir termal sistem olarak ele alınmalı ve bu açıdan incelenmelidir. Bu nedenle tüm termal sistemlerde olduğu gibi kurutma işlemi için de termodinamik analiz büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda tüm termal sistemlerin verimliliğini artırmak amacıyla enerji ve ekserji analizleri açık literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuçlar, termodinamik alanlar başta olmak üzere tüm mühendislik uygulamalarında verimsizliklerin azaltılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Gıda sistemlerinin enerjik performansı, bu sistemlerin ekserjetik performansının aksine yaygın olarak gerçekleştirilir. Oysa son on yılda yapılan çoğu çalışma, enerji analizlerinin ekserji analizleriyle birleştirilerek daha değerli hale getirilebileceğini göstermiştir. Bu amaçla tüm ısı işlemlerde olduğu gibi gıda kurutma işleminde de enerji analizlerinin yanı sıra ekserji analizlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle gıda kurutma proseslerinin ekserji analizlerine ilişkin açık literatürde son dönemde yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenmektedir:

Araujo ve ark., (2021) çalışmalarında armut dilimlerini farklı sıcaklıklarda kızılötesi infrared soba ile) kurutulmasını gerçekleştirmiştir. Kurutma kinetiği ve termodinamik analiz için 3 mm kalınlığındaki armut dilimleri kızılötesi kurutucuda 50 ila 100°C arasındaki sıcaklıklarda sabit kütleye kadar kurutmuşlardır. Kurutmayı temsil etmek için deneysel verilere zamanın bir fonksiyonu olarak farklı matematiksel modeller yerleştirilip uygulanarak enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları uygulanması için Henderson ve Pabis'in değiştirilmiş modelinin en iyi

şekilde temsil ettiği görülmüştür. Etkili difüzyon katsayısı hesaplanmış ve sıcaklık arttıkça doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Aktivasyon enerjisi de hesaplanarak en düşük spesifik enerji tüketimi yüksek kurutma sıcaklığı için (10,28 kWh/kg) bulunmuştur. Kurutma sıcaklığının artması prosesin enerji ve ekserji verimliliğini olumlu yönde etkilediği bulunmuştur.

Dotto ve ark., (2016) çalışmalarında Armutların (*Pyrus spp.*) kurutulmasını detaylı olarak inceleyip dış dirençli ve dış dirençli difüzyon-konvektif model uygulamıştır. Operasyon boyunca nem içeriğini ve sıcaklık profillerini temsil etmek için kurulan model diferansiyel kısmi denklemlere dayanmakta olup, bu denklemler ortogonal sıralama yöntemiyle çözüldü. Kurutma denemeleri armut dilimleri için, doğal ve basınçlı hava konveksiyonu koşulları altında, 40 ve 80°C’de yapıldı. Difüzyonlu-konvektif modelin deneysel profilleri tahmin edebildiği bulunmuştur. Dış kütle transferi Biot sayısının düşük değerleri ($Bi_M < 0,05$) için modelde direnç dikkate alınmıştır. Ayrıca, etkili kütle yayılımı (DEF) ve etkili termal iletkenlik (kEF) hesaplanmıştır.

Doymaz ve İsmail (2012) çalışmalarında armut dilimlerinde sıcaklığın kuruma kinetiğine etkisini araştırmak için 55, 65 ve 75 °C sıcaklıklarda kurutma gerçekleştirmiş ve kurutmada hava sıcaklığının artmasıyla birlikte sürenin önemli ölçüde azaldığını bulmuştur. Literatürde mevcut yedi matematiksel model kurutma desenleriyle test edilmiştir. Armut dilimlerinin

kurutulmasında Wang ve Singh ve Midilli ve ark. modellerinin en iyi sonuçları verdiği bulunmuştur.

Doymaz (2013) çalışmalarında armut kurutma deneylerini 50, 57, 64 ve 71 °C sıcaklıklarda 5 mm kalınlığındaki armut dilimleri üzerinde 2,0 m/s hava hızıyla gerçekleştirmiştir.

Kurutmadan önce armut dilimleri sitrik asit çözeltisiyle ön işleme tabi tutulmuş ve (%0,5 a/a, 1 dakika, 20 °C) veya sıcak suda (1 dakika, 85 °C) be-yazlatılmıştır. Ayrıca işlenmemiş numuneler de kontrol olarak kurutulmuştur. Armut dilimlerinin en kısa kuruma süresi sitrik asit ile ön işleminden geçirilerek elde edilmiş ve Armut dilimlerinin tüm kurutma işleminin azalan oranlı bir periyotta gerçekleştiği gözlenmiştir. Dört armut dilimlerinin kurutma verilerine uyacak şekilde matematiksel modeller test edildi. Midilli ve ark. modelinin kuruma davranışını tanımlayan en iyi model olduğu bulunmuştur. Kurutma işlemi sırasında nem transferinin etkili yayılımı, $8,56 \times 10^{-11}$ ve $2,25 \times 10^{-10}$ m²/sn, ve armut dilimlerinde nem difüzyonunun aktivasyon enerjisi 34,95–41,00 kJ/mol olduğu bulunmuştur.

Essalhi ve ark., (2017) çalışmalarında Armut kurutmaya yönelik yeni konsepti önermiştir. Dolaylı bir güneş enerjili kurutucu için güneş enerjili hava kollektörünün soğurucusunun deneysel testleri Güneş Enerjisi ile yapılmış ve 24 saatte kurutma ile numunelerin kütlesi 997.3 gramdan 135.13 grama azaltılmıştır.

Guine ve ark., (2007) çalışmalarında Armutların kuruma davranışını sürekli olarak temsil etmek için difüzyon temelli bir model benimsemiştir. Konvektif kurutucuda armutların özelliklerinin kurutma boyunca değişimi dikkate alınarak geliştirilen program, bazı işletim sistemindeki değişikliklerden kaynaklanan önemli sayıda durumu simüle etti. Test edilen sıcaklıklar 30, 40 ve 50 °C, hava hızları 0,5, 1,0 ve 1,5 m/s idi ve bağıl kurutma havasının nemi %40, %50 ve %60 idi. Analiz edilen durumlardan ve nihai ürün için gerekli spesifikasyonlar dikkate alındığında, en iyi kurutma 40°C'de, 1,5 m/s kurutma hava hızıyla ve

%60 bağıl nem içererek gerçekleştirilmelidir.

Guine ve ark., (2011) çalışmalarında Armutların kurutulması için farklı yöntemler, yani güneş sobası, güneş enerjili kurutucu ve tünel kurutucu üzerinde deneyler yapmıştır. Sonuçlar gösterdi ki tüm yöntemler içinde geleneksel güneşte kurutmaya göre güneş sobasının kuruma süresini %40 ve tünel kurutucuda %60 gibi önemli bir azalmaya yol açtığı görülmüştür.

Guine ve ark., (2013) çalışmalarında armut dilimleri için üç kurutma sistemi (güneş sobası, doğrudan güneş enerjili kurutucu ve kurutma tüneli) kullanarak kütle transferi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kütle transfer özelliklerinin hesaplanmasında büzülme de dahil olmak üzere Fick denklemi en iyi metodoloji olduğu bulunmuştur. Güneş enerjili kurutucu ile kurutma tünelindeki difüzyon katsayılarının değerleri benzer, ancak Güneş enerjisi sobasında yayılım daha düşüktü, bu da dahili nem transferinin olduğunu gösteriyordu. Kütle transfer katsayısına bakıldığında bu, güneş enerjili kurutucuda daha yüksekti ve bu da yüzey kütle transferinin daha iyi bir verimlilik verdiğini göstermektedir.

Guine, (2008) çalışmalarında Armutların kurutulmasında kuruma davranışını temsil etmek için daha önce geliştirilmiş difüzyona dayalı bir model ile kurutma deneylerini 30, 40 ve 50 °C'de, %60 oranında hava içeren ortamda gerçekleştirilmiştir. 0,5 ila 1,5 m/s arasında değişen bir hava hızı için kurutma eğrilerinin yanı sıra, zaman, nem ve şeker konsantrasyonlarının uzaydaki değişimleri analiz edildi. Deney noktaları ile verilen öngörüler arasındaki iyi uyumlu bir model geliştirilmiştir. Bu modelin kurutma davranışını yeterince açıkladığı sonucuna varmayı sağlamıştır. Yine, Guine ve Castro, (2002) çalışmalarında ana kütle transferi olgusu ve Armutların kurutulması sırasında meydana gelen olaylar araştırılmıştır. Kurutma oranları ayrıca 30, 40 ve 50 °C sabit kurutma sıcaklıklarında da incelenmiştir.

Deneyler zaman gelişimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Su ve şeker içeriğinin radyal profilleri çıkarılmıştır. Sonuçlardan elde edilen kuruma hızı eğrileri tipiktir, 30°C'deki kurutma işlemi daha kademelidir, ama aynı zamanda 50 °C'dekinden çok daha yavaştır.

Juarez ve ark., (2019) çalışmalarında farklı çeşit (dikenli) Armutların kurutulmasında hava sıcaklığının (50 ila 80°C) ve numune kalınlığının (4, 6 ve 8 mm) kuruma kinetiği üzerindeki etkisi analiz etmişlerdir. Kuruma eğrilerini elde etmiş ve kuruma verileri Lewis, Henderson & Pabis, Peleg ve Page matematiksel modellerine uydurulmuştur. Modeller iki istatistiksel parametre (belirleme katsayısı ve indirgenmiş ki-kare) ile karşılaştırılmıştır Kurutma sırasındaki su kaybı, kurutma koşullarına bağlı olarak $0,75$ ile $7,05 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ arasında değişen Fick denklemi ve etkili yayılım ile tanımlanmış ve aktivasyon enerjisi, 4, 6 ve 8 mm kalınlıktaki katmanlar için sırasıyla 34,51, 29,86 ve 25,31 kJmol^{-1} olan Arrhenius denkleminde hesaplanmışlardır. Page modeli, dikenli armut meyvesinin ince katmanlarının kurutulması işlemine yeterince uyduğunu görmüşlerdir.

Kalantari ve ark., (2023) çalışmalarında, konvektif sıcak hava kurutucusunun farklı parametrelerinin etkisi ince dilimlenmiş armutların farklı kurutma aşamalarındaki kütle transfer katsayıları analitik ve deneysel olarak araştırıp bulmuştur. Sonuçlara göre ilk aşamada başlangıç nem içeriğinin (MC) %87-57 olmasıyla başlayan kurutma, konvektif ısı transfer katsayısı, giriş hava sıcaklığı ve ilk MC Kuruyan ürünün kütle aktarım hızı üzerinde en yüksek etkiye sahip olan ürün miktarıdır. İkinci kurutma aşamasında (%57'den %27'ye MC), iç gözenek yapısı meyvenin iç MC'si ve kesilen tabakaların kalınlığı ürünün kütle transfer katsayısını kontrol eden parametrelerde en çok etkileyen faktörlerdir. Üçüncüde kurutma bölgesi (%27'lik MC'den son MC'ye kadar), giriş havası sıcaklığı Üründen kütle transfer hızı üzerinde en büyük etkiye sahipti. Bu kurutma bölgesinde $0,5 \text{ m/s}$ hava akış hızında kurutma sıcaklığının 50°C 'den 60°C 'ye yükseltilmesi ile etkin difüzyon katsayısının $1,19 \times 10^{-7}$ 'den $4,09 \times 10^{-7}$ 'ye (m^2/s^2) yükseltilmesi sağlandı.

Karacabey ve Buzrul (2017) çalışmalarında, elma ve armutun 40, 50, 60, 70 ve 80°C 'deki kuruma verileri Weibull modeliyle tanımlanmış ve Weibull modelinin şekil parametresinin sıcaklığa bağlı olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, sabit şekil parametrelili azaltılmış Weibull modeli, kurutma verilerini hafif bir uyum iyiliği kaybıyla tanımlamak için birincil model olarak önerildi. Zaman parametresinin sıcaklığa bağlılığı (başlangıçtaki nem oranını %90 oranında azaltmak için gereken süre), ikincil modeller olarak iki özel modelle tanımlanabilir. Entegre modeller kullanılarak yapılan tahminler, elmanın sırasıyla 45 ve 65°C 'de ve armutun sırasıyla 55 ve 75°C 'de deneysel kurutma verileriyle neredeyse mükemmel bir şekilde uyum sağladı. Yayınlanan verilerle yapılan kinetik analizler, indirgenmiş Weibull modelinin belirli meyvelerin kuruma verilerini tanımlamak için de başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.

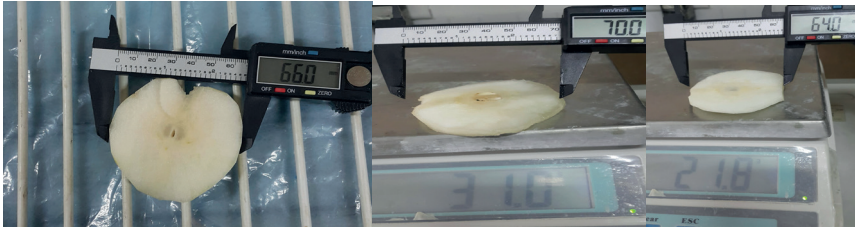
2. MATERİYAL METOD

Verilen enerji olan elektrik enerjisi ısıya dönüştürülürken küçük bir kayba uğramakta, ısı enerjisini ve ekserjisini taşıyan hava ürünün kurutulmasında kullanıldıktan sonra çevreye atılmaktadır. Kayıp ekserji %100 dür,

yani ekserjinin hepsi kullanılmakta karşılığında nemi alınmış kurutulmuş ürün elde edilmektedir. Burada ürünün kimyasal ekserjisi değişmekte olup, ürünün başlangıçtaki ve sondaki ekserjisi ölçülememekte olduğundan giren ekserji, çıkan ve kayıp olan ekserji dengesi kurulamamaktadır.

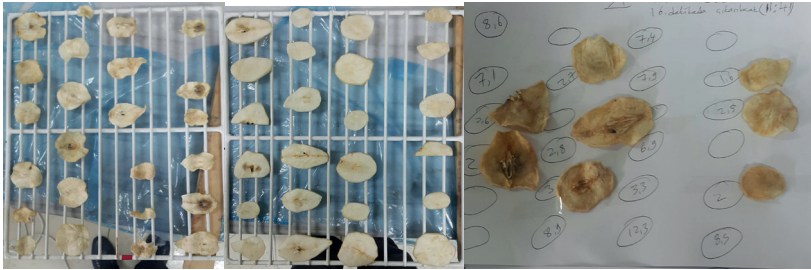


Şekil 1. Kurutulacak olan armutların resimleri



Şekil 2. Yıkayıp soyularak dilimlenmiş en boy ve ağırlıkları hassas ölçülmüş dilimler.

Kurutulacak armutların ve yıkayıp soyularak dilimlenmiş en boy ve ağırlıkları hassas ölçülmüştür. Her bir dilimin başlangıçtaki en boy ve ağırlığı kayda alınarak kurutma sürecindeki ve sonundaki değerlerle karşılaştırılmış hal değişiminin eğrileri çizilmiştir.



Şekil 3. Kurutma sürecinde ve sürecin sonunda armut dilimlerinin görünümleri.

Şekil 3'te kurutma sürecinde ve sürecin sonunda armut dilimlerinin görünümleri verilmiştir. Kuruması tamamlanmış dilimin son ağırlığı ve eni-boyu ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Taze dilimin ağırlığı ile kurutulmuş halinin ağırlığı farkının buharlaşan su olduğu farz edilmiştir. Burada vitamin, asit, baz, mineral su olmayan maddelerin de kayıpları mevcut olup bunlar ölçülemediğinden ve çok küçük değerlerde olduklarından göz önüne alınmayıp ihmal edilmişlerdir.

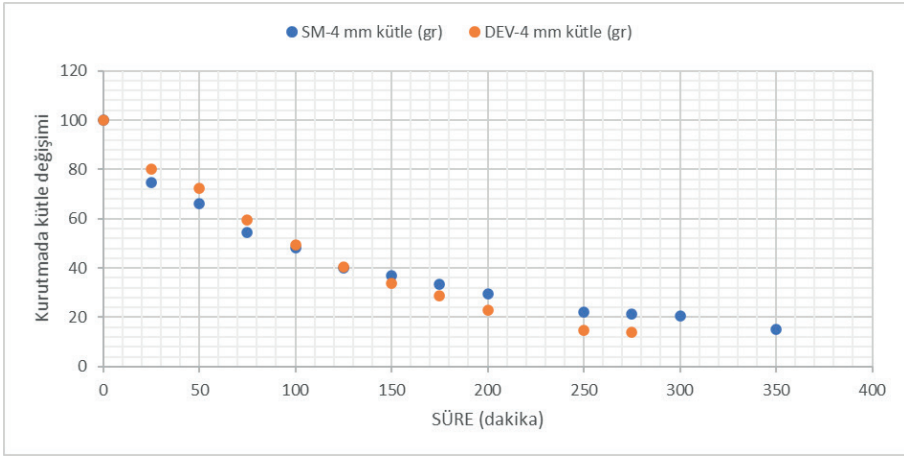
3. BULGULAR

Armutlar yıkandıktan sonra soyulmuş 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalınlığında dilimlenmiş ve kurutucu makinasına konmuştur.

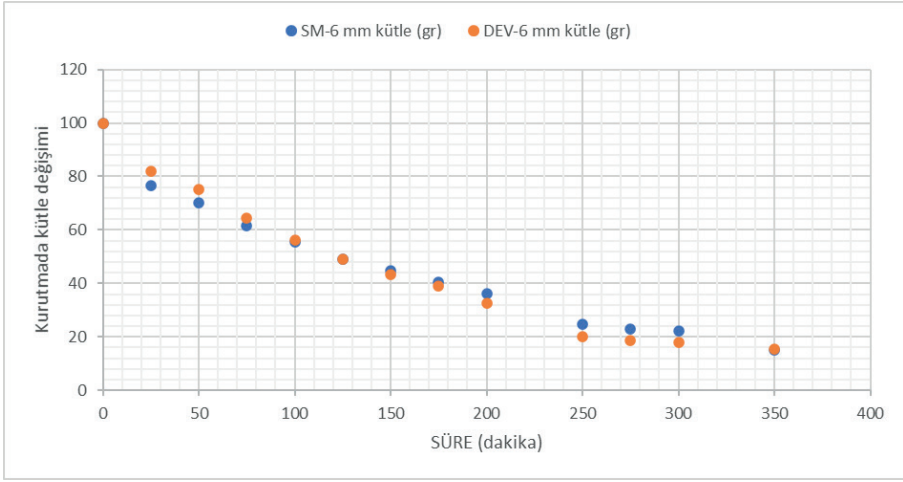
Şekil 4'te hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için 4 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.

Şekil 5'te hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için 6 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.

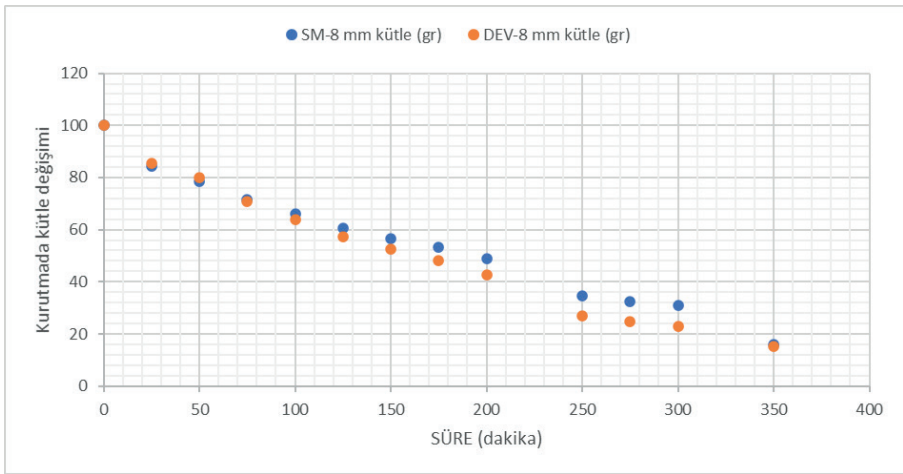
Şekil 6'da hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için 8 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



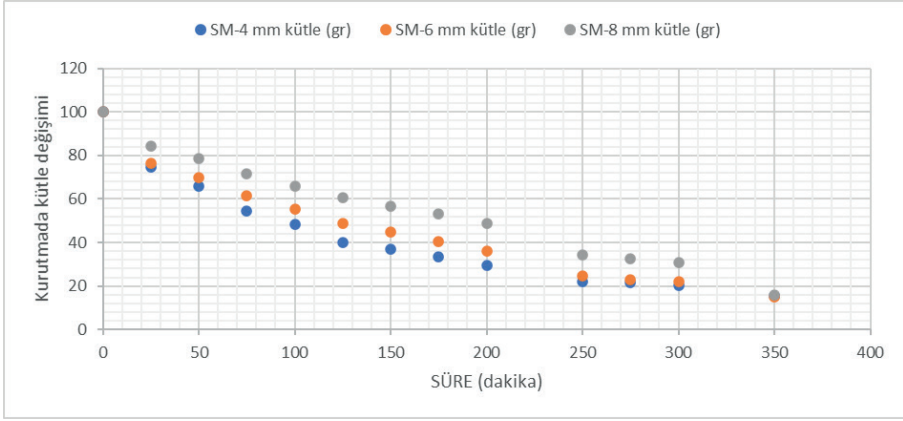
Şekil 4. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için.



Şekil 5. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için.

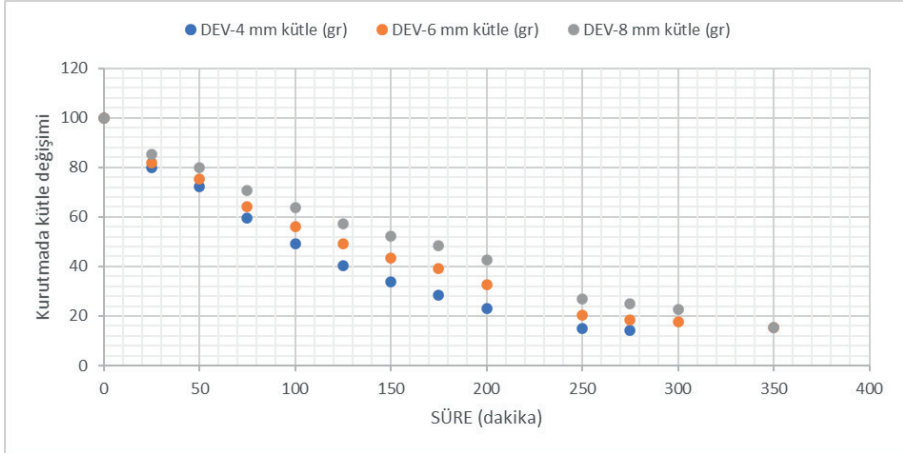


Şekil 6. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için.



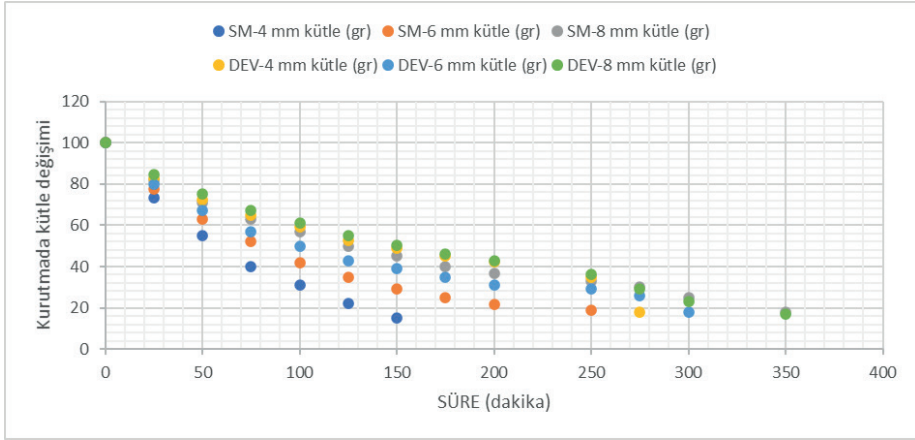
Şekil 7. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 7’de hava sıcaklığı ve hızı 50°C 0.6 m/s için 4, 6, 8 mmlik kullanılan SM dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25’er ve 50’şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



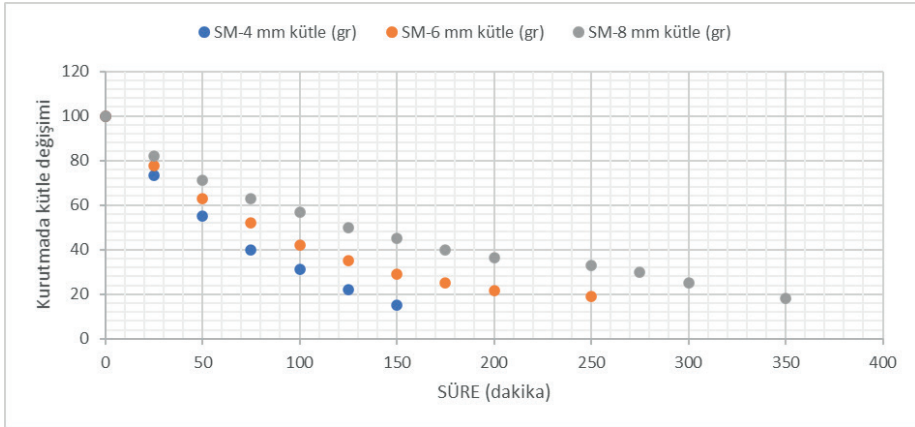
Şekil 8. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 8’de hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 0.6 m/s için 4, 6, 8 mmlik kullanılan DEV dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25’er ve 50’şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



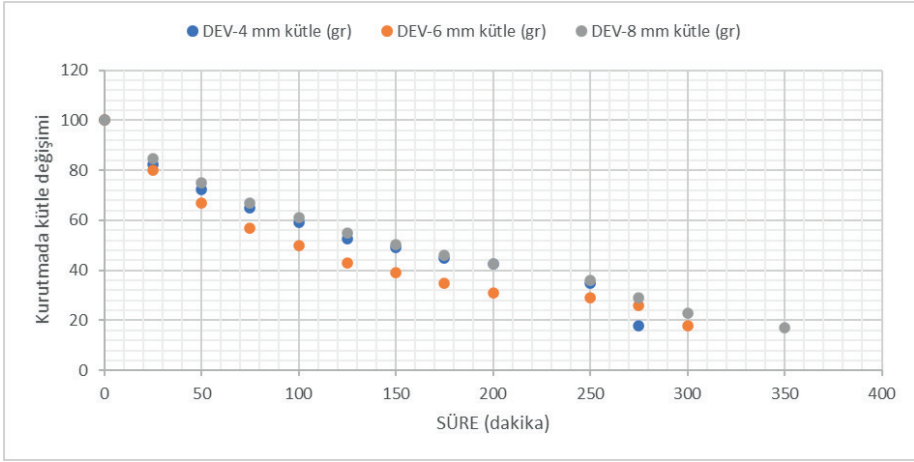
Şekil 9. Hava sıcaklığı ve hızı 50 °C ve 1.6 m/s için.

Şekil 9'da hava sıcaklığı ve hızı 50 °C ve 1.6 m/s için 4, 6, 8 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



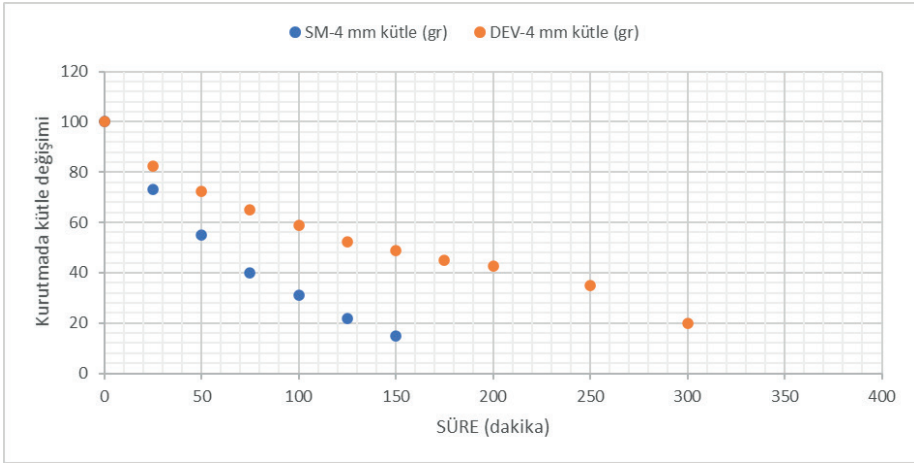
Şekil 10. Hava sıcaklığı ve hızı 50 °C ve 1.6 m/s için.

Şekil 10'da hava sıcaklığı ve hızı 50 °C ve 1.6 m/s için 4, 6, 8 mmlik kullanılan SM dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



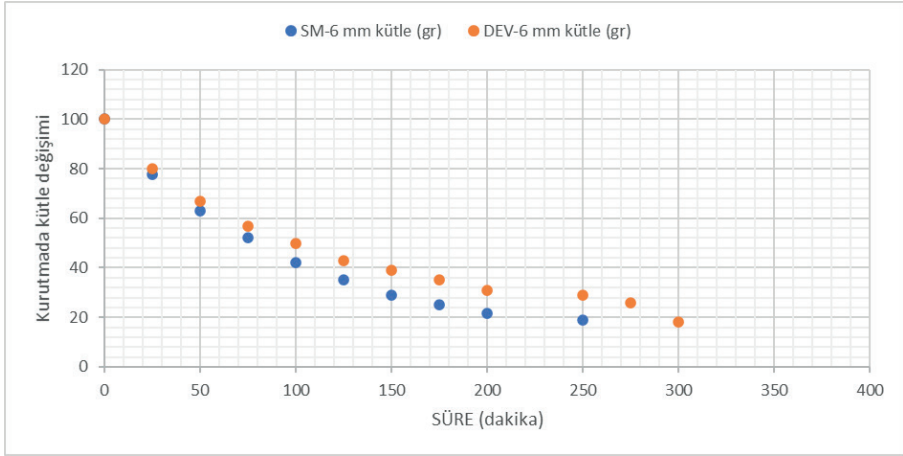
Şekil 11. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 11'de hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için 4, 6, 8 mmlik kullanılan DEV dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüz-lük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



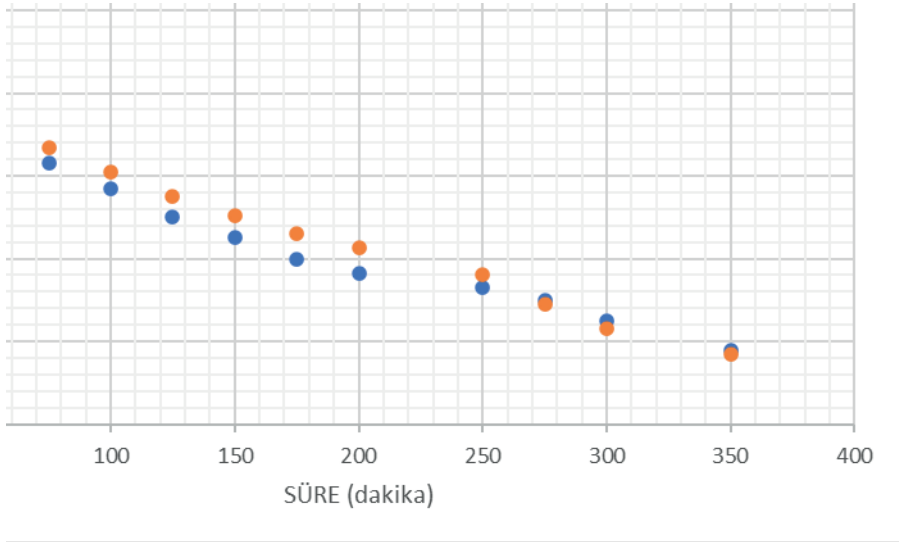
Şekil 12. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 12'de hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için 4 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüz-lük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



Şekil 13. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 13'te hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için 6 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mıkuru/milk değerleri verilmiştir.

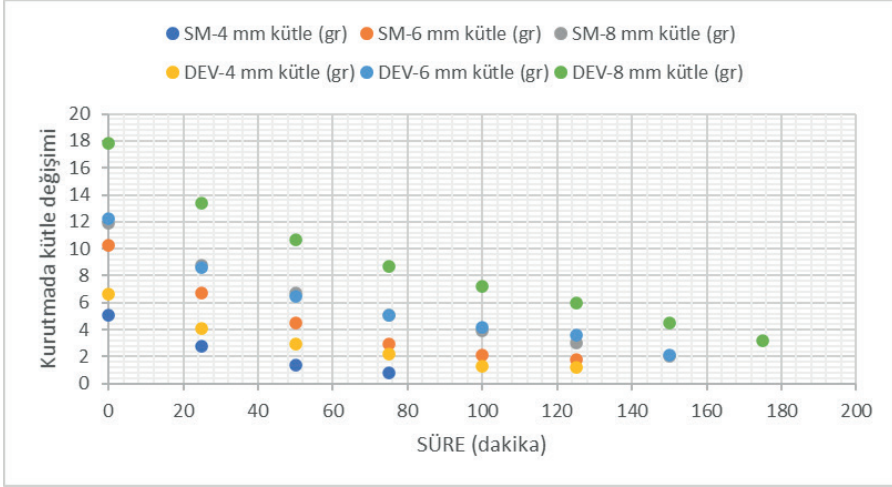


Şekil 14. Hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 14'te hava sıcaklığı ve hızı 50°C ve 1.6 m/s için 8 mmlik kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mıkuru/milk değerleri verilmiştir.

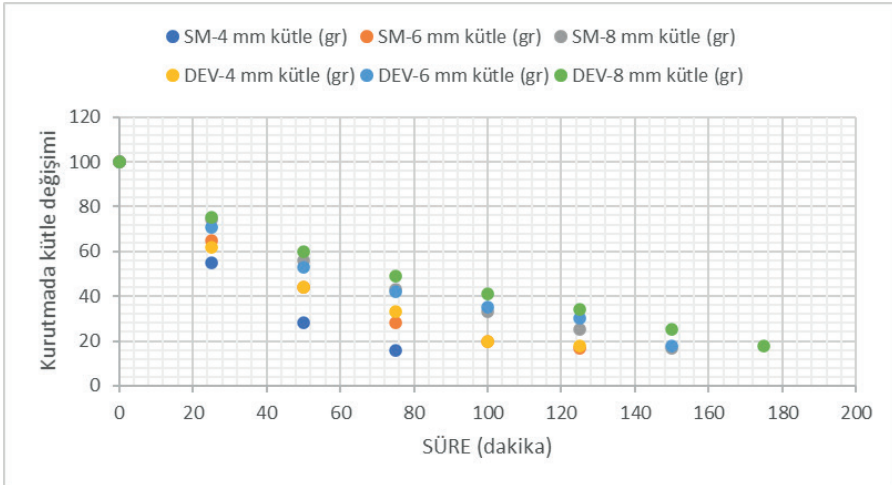
Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için kullanılan dilimlerin gerçek

ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere değerleri hesaplanmış, kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş m_{kuru}/m_{ilk} değerleri verilmiştir.



Şekil 15. Hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 1.6 m/s için.

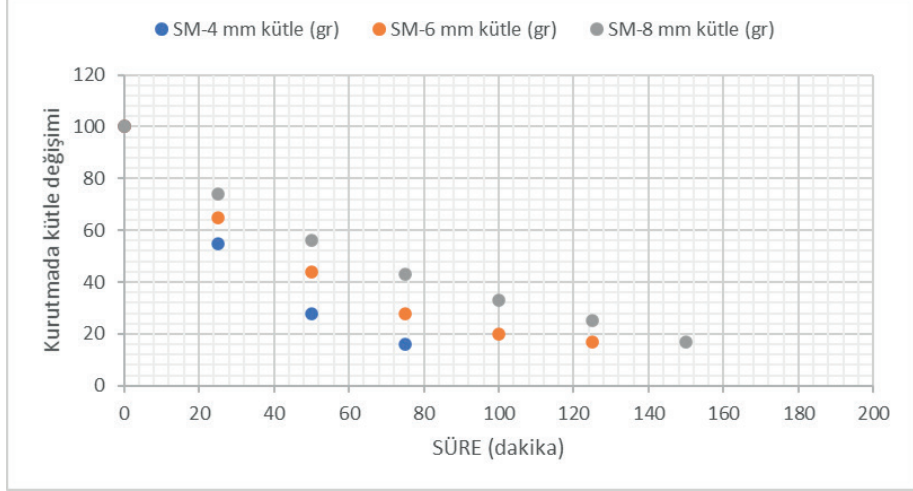
Şekil 15'te hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 1.6 m/s için kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere değerleri verilmiştir.



Şekil 16. Hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 1.6 m/s için.

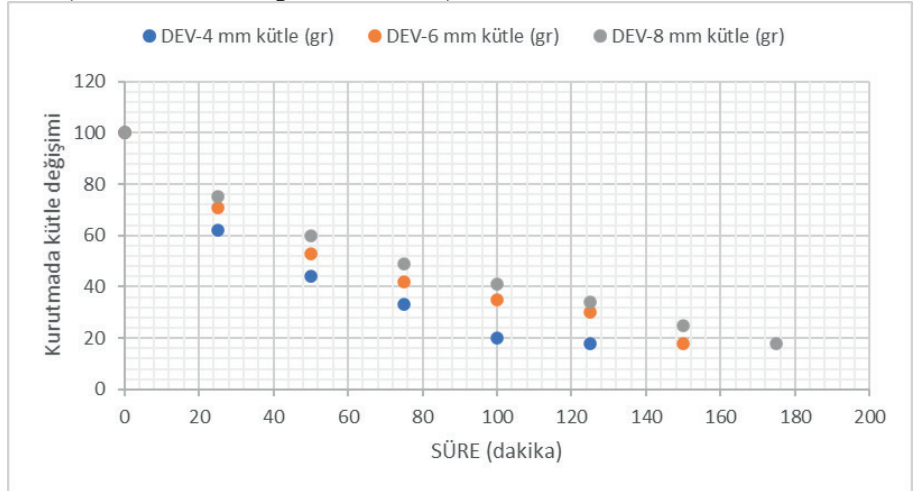
Şekil 16'da hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 1.6 m/s için kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla ol-

mak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmistir.



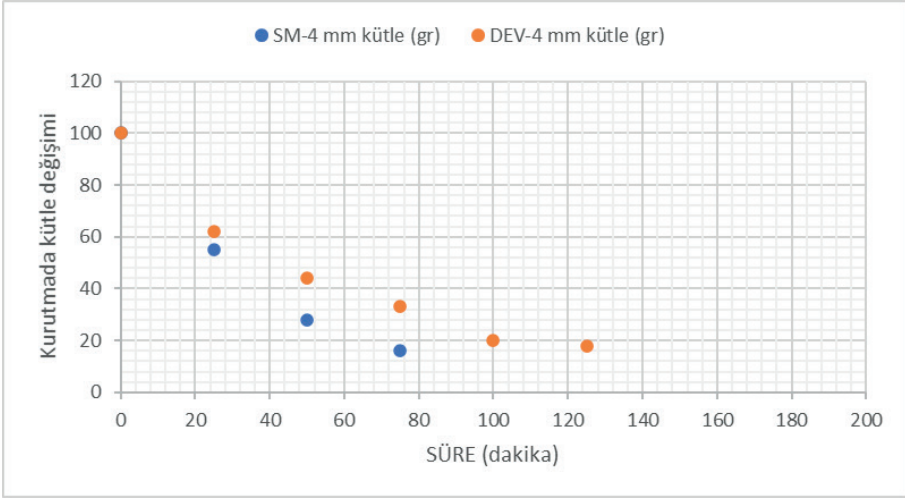
Şekil 17. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 17'te de hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için kullanılan SM dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'er dakika aralyla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



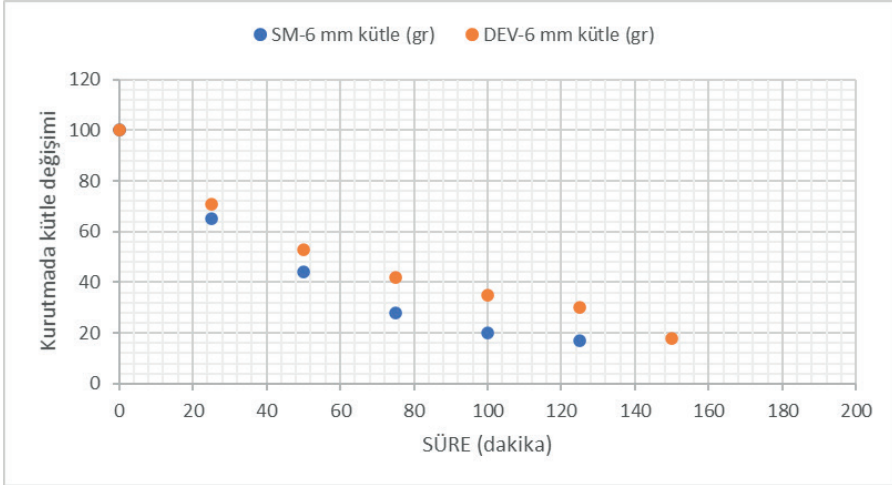
Şekil 18. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 18'de hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için kullanılan DEV dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'er dakika aralyla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



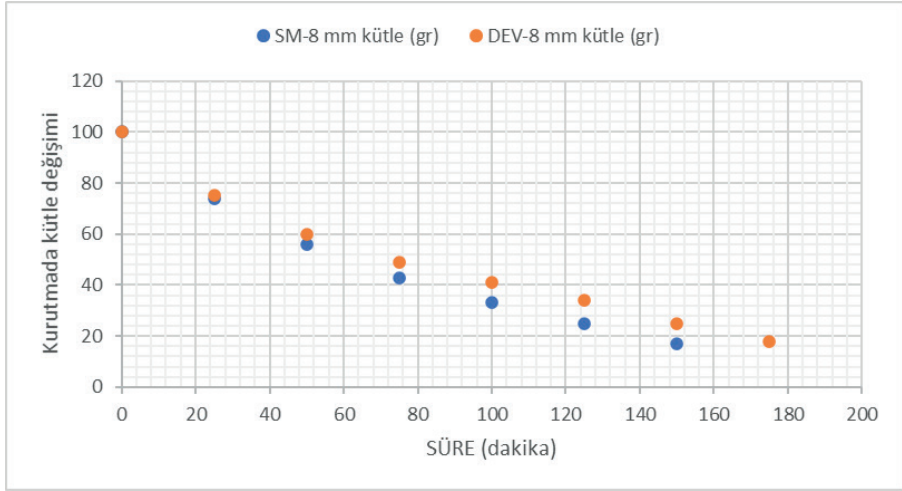
Şekil 19. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 19'da hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için kullanılan 4 mm'lik dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika aralıklarla olmak üzere yüzölçümüne orana çevrilmiş m_{kuru}/m_{ilk} değerleri verilmiştir.



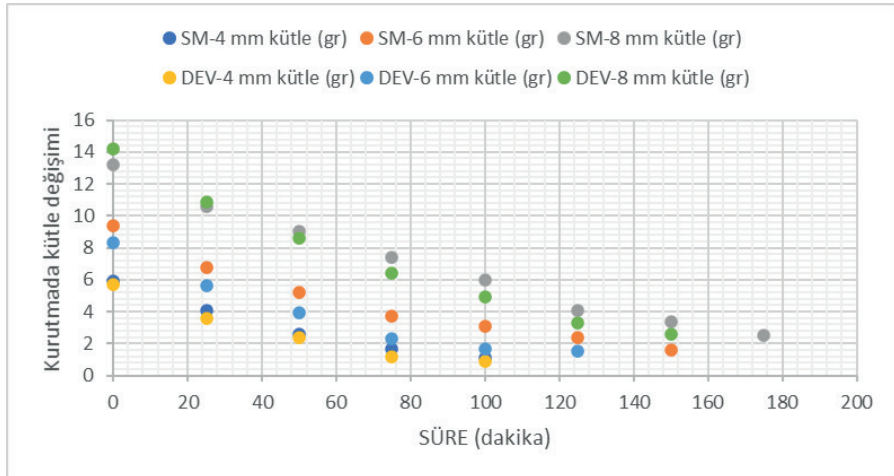
Şekil 20. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için.

Şekil 20'de hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 1.6 m/s için kullanılan 6 mm'lik dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika aralıklarla olmak üzere yüzölçümüne orana çevrilmiş m_{kuru}/m_{ilk} değerleri verilmiştir.



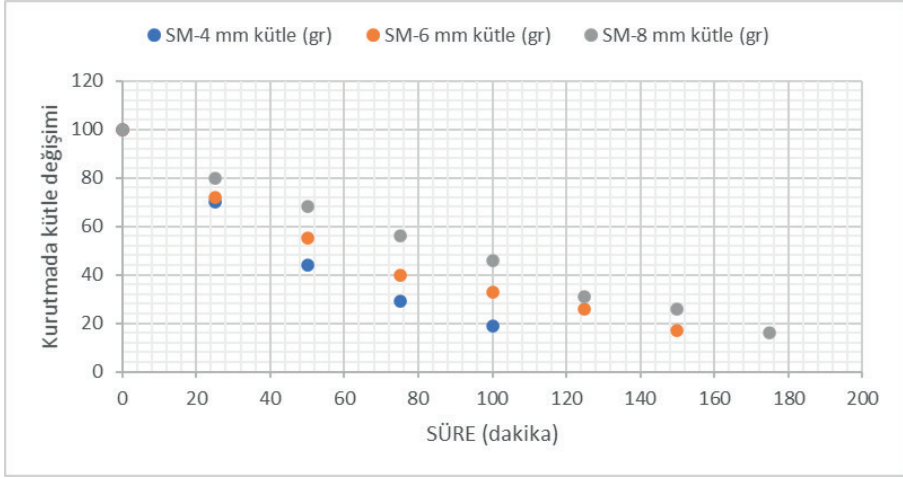
Şekil 21. Hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 1.6 m/s için.

Şekil 21'de hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 1.6 m/s için kullanılan 8 mm'lik dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



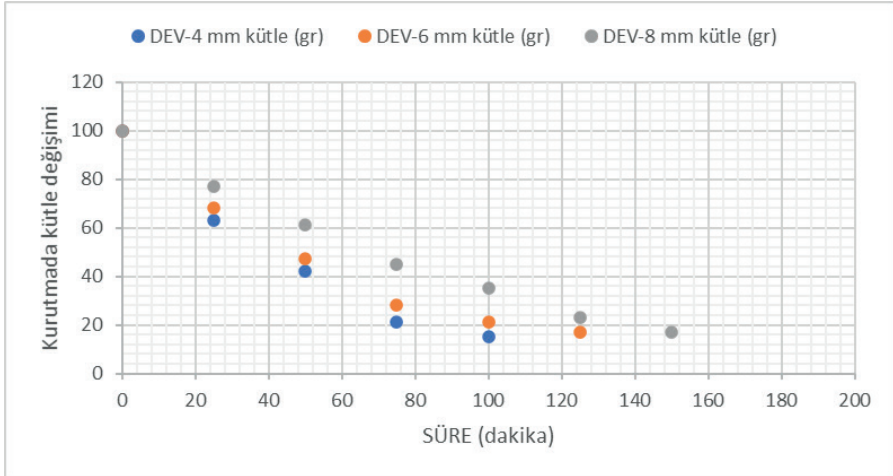
Şekil 22. Hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 0.6 m/s için.

Şekil 22'de hava sıcaklığı ve hızı 85 °C ve 0.6 m/s için kullanılan dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere değerleri verilmiştir.



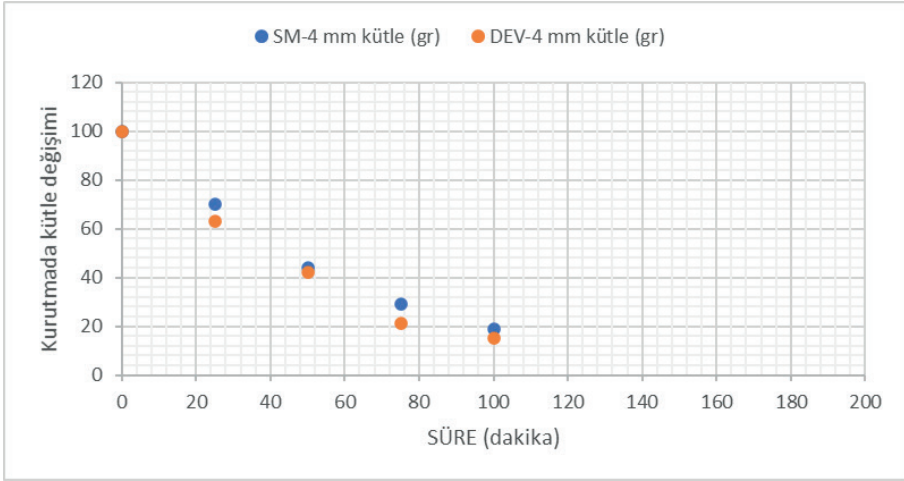
Şekil 23. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 23’de hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için kullanılan SM dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25’er ve 50’şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mıkuru/milk değerleri verilmiştir.



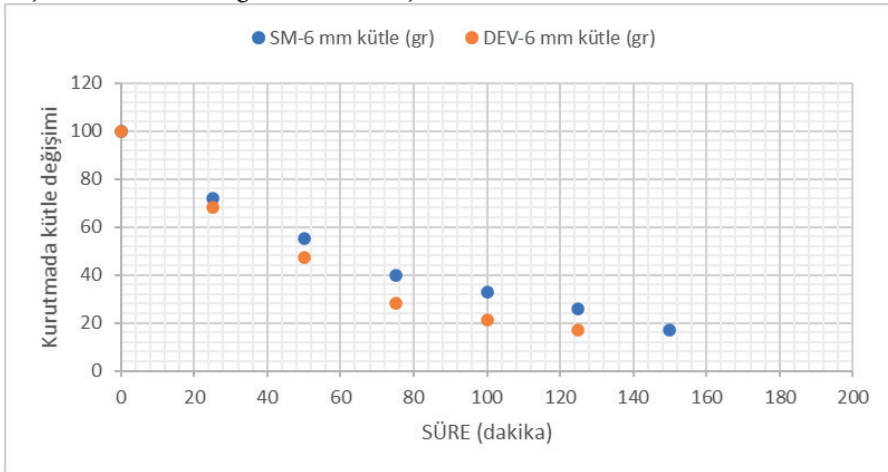
Şekil 24. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 24’ee hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için kullanılan DEV dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25’er ve 50’şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mıkuru/milk değerleri verilmiştir.



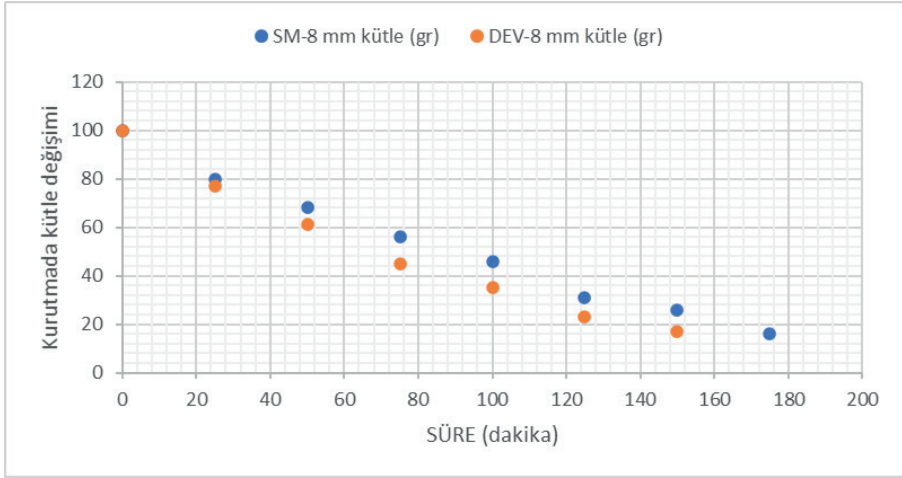
Şekil 25. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 25'te hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için kullanılan 4 mmlik dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



Şekil 26. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 26'da hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için kullanılan 6 mmlik dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25'er ve 50'şer dakika arayla olmak üzere yüzlük orana çevrilmiş mkuru/milk değerleri verilmiştir.



Şekil 27. Hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için.

Şekil 27’de hava sıcaklığı ve hızı 85°C ve 0.6 m/s için kullanılan 8 mm’lik dilimlerin gerçek ağırlıkları kuruma süreleri ve bu sürelerde ortaya çıkan gerçek ağırlıkları 25’er ve 50’şer dakika arayla olmak üzere yüzölçümüne orana çevrilmiş m_{kuru}/m_{ilk} değerleri verilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu deneylerde elde edilen bulgular yukarıda verilmiş olup, burada yapılan ölçümler ile, enerji sarfiyatının, hava hızının, hava debisinin, hava neminin, kurutma süresinin, kurutulacak meyve dilimi kalınlığı, yüzey alanı ve çapının, kurutma üzerine etkisi gibi ilişkilerin ortaya çıkarılması, bu ilişkilerin en iyilenmesi, ampirik ve teorik denklemlerle ifadesi ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak yorum ve tartışmasının yapılması, önerilerin ve çözümlerin sunulması ve başta SCI makale olmak üzere bilimsel yayınların yapılması başarı ölçütleri olarak alınacağı başvuru belirlenmiştir.

Verilen enerji olan elektrik enerjisi ısıya dönüştürülürken küçük bir kayba uğramakta, ısı enerjisini ve ekserjisini taşıyan hava ürünün kurutulmasında kullanıldıktan sonra çevreye atılmaktadır. Kayıp ekserji %100 dür, yani ekserjinin hepsi kullanılmakta karşılığında nemi alınmış kurutulmuş ürün elde edilmektedir. Burada ürünün kimyasal ekserjisi değişmekte olup, ürünün başlangıçtaki ve sondaki ekserjisi ölçülememekte olduğundan giren ekserji, çıkan ve kayıp olan ekserji dengesi kurulamamaktadır.

Ayrıca kuruma süresinin belirli bir zaman anındaki nem oranı Newton, Page, Geliştirilmiş Page I, Geliştirilmiş Page II, Henderson ve Papis, Logaritmik, İki terimli, İki terimli ve Ekspansiyel, Wang ve Sing ve Difüzyon yaklaşım modelleri ile modelleneceği ve bu modellerde bulunan katsayılar

çoklu regresyon yöntemiyle analiz edileceği ve Modellerin tahmini standart hatası (RMSE), khi-kare (χ^2) ve regresyon katsayısı (R^2) değerleri belirleneceği başvuruda belirlenmiştir.

Bu deneylerden elde edilen bulgular ve veriler yukarıda verilmiş olup bunlardan bir adet uluslararası kitap yazılmış olup basım aşamasındadır. Ayrıca ICCESN-2024 kongresine bir adet bildiri sunulmuş olup burada katılımcılarla elde edilen bir kısım veriler tartışılmıştır. Halen bu veriler tarafımızca yorumlanmakta ve modellenmekte olup bir ya da birkaç SCI makale için üzerinde çalışılmaktadır.

Başvuruda belirtilmiş olan başarı ölçütleri sağlanmış olup daha fazlası için çalışılmaktadır.

KAYNAKÇA

- de Araujo, M. E. V., Barbosa, E. G., Lopes, R. P., Corrêa, P. C., & Barbosa, E. G. (2021). Infrared drying of pear slices: Drying kinetics, energy, and exergy analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 44(12), e13915. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13915>
- Dotto GL, Souza TB, Simoes MR, Morejon CFM, Moreira MFP. Diffusive-convective model considering the shrinkage applied for drying of pears (pyrus spp.). *J Food Process Eng*. 2017;40:e12503. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12503>
- İbrahim Doymaz and Osman İsmail. Experimental Characterization and Modelling of Drying of Pear Slices. *Food Sci. Biotechnol.* 21(5): 1377-1381 (2012). DOI 10.1007/s10068-012-0181-3
- Ibrahim Doymaz. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. *International Journal of Food Science and Technology* 2013, 48, 1909–1915. doi:10.1111/ijfs.12170
- Hajar Essalhi, Rachid Tadili, M.N Bargach. Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. *Pear Drying Test. Energy Procedia*, 141 (2017) 29-33. 10.1016/j.egypro.2017.11.114
- Raquel P. F. Guiné, Maria João Barroca & Maria João R. Lima. (2011). Comparative Study of the Drying of Pears Using Different Drying Systems. *International Journal of Fruit Science*, 11:1, 55-73, DOI: 10.1080/15538362.2011.554071
- R.P.F Guiné, M.J. Barroca & V. Silva (2013) Mass Transfer Properties of Pears for Different Drying Methods, *International Journal of Food Properties*, 16:2, 251-262, DOI: 10.1080/10942912.2011.551864
- R.P.F. Guine, A.E. Rodrigues, M.M. Figueiredo. (2007) Modelling and simulation of pear drying. *Applied Mathematics and Computation* 192 (2007) 69–77. doi:10.1016/j.amc.2007.02.121
- Raquel P.F. Guine. (2008). Pear drying: Experimental validation of a mathematical prediction model. *Food and bioproducts processing* 86 (2008) 248–253.
- Raquel P. F. Guiné & José Almiro A. M Castro (2002) PEAR DRYING PROCESS ANALYSIS: DRYING RATES AND EVOLUTION OF WATER AND SUGAR CONCENTRATIONS IN SPACE AND TIME, *Drying Technology*, 20:7, 1515-1526, DOI: 10.1081/DRT-120005865
- MA. DEL ROSARIO ABRAHAM-JUÁREZ, VÍCTOR OLALDE-PORTUGAL, ABEL CERÓN-GARCÍA & MARÍA ELENA SOSA-MORALES. Hot Air Drying Kinetics of Thin Layers of Prickly Pear Fruit Paste. *Sains Malaysiana* 48(2)(2019): 361–367 <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4802-13>
- Kalantari, D., Naji-Tabasi, S., Kaveh, M., Azadbakht, M., Majnooni, M., Khorshidi, Y., Asghari, A., & Khalife, E. (2023). Drying kinetics and shrinkage rate of thin-sli-

ced pears in different drying stages. Journal of Food Process Engineering, 46(3), e14264. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14264>

Erkan Karacabey & Sencer Buzrul (2017) Modeling and Predicting the Drying Kinetics of Apple and Pear: Application of the Weibull Model, Chemical Engineering Communications, 204:5, 573-579, DOI: 10.1080/00986445.2017.1291427



KURUTMA PROSESLERİ VE GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTUCULARIN İNCELENMESİ

“ ”

Dinçer Akal¹

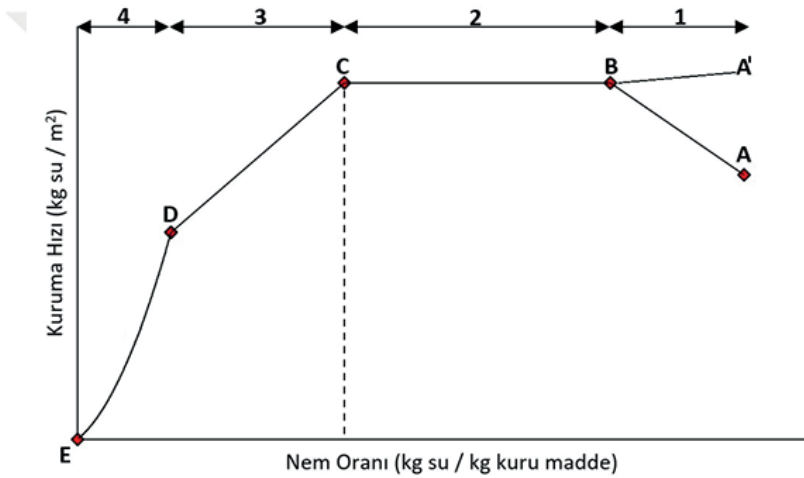
¹ Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne
dincerakal@trakya.edu.tr ORCID: 0000-0003-0055-5471

1.GİRİŞ

İnsanların temel gereksinimlerinden biri beslenme olup, bu ihtiyacın karşılanmasının temelinde tarım, hayvancılık ve tohum üretimi yer almaktadır. Özellikle tohum, tarımsal üretimin başlangıç noktası olması nedeniyle verimlilik, kalite ve sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. İnsanlık tarihinin başlangıcından itibaren tarım; toplumların yaşamlarını sürdürebilmesi, ülkelerin ekonomik gelirine ve istihdamına katkı sağlaması, birçok sektöre hammadde temin etmesi, ihracata doğrudan veya dolaylı destek vermesi ile biyolojik çeşitlilik ve ekosistem üzerindeki olumlu etkileri sayesinde önemli bir faaliyet alanı olmuştur. Bunun yanı sıra tarım sektörü, devletlerin ekonomik ve sosyal politikalarının belirlenmesinde de etkili bir unsur olarak öne çıkmıştır. Tarım sektörü; tohum üretiminden başlayarak gıda ürünlerinin yetiştirilmesi, işlenmesi, depolanması, taşınması ve tüketiciye ulaştırılması süreçlerini kapsayan çok yönlü bir yapıya sahiptir. Ekonomik, toplumsal ve çevresel kalkınma açısından kritik öneme sahip olan tarım, teknolojik gelişmelerin etkisiyle günümüzde daha stratejik bir konuma ulaşmıştır[3].

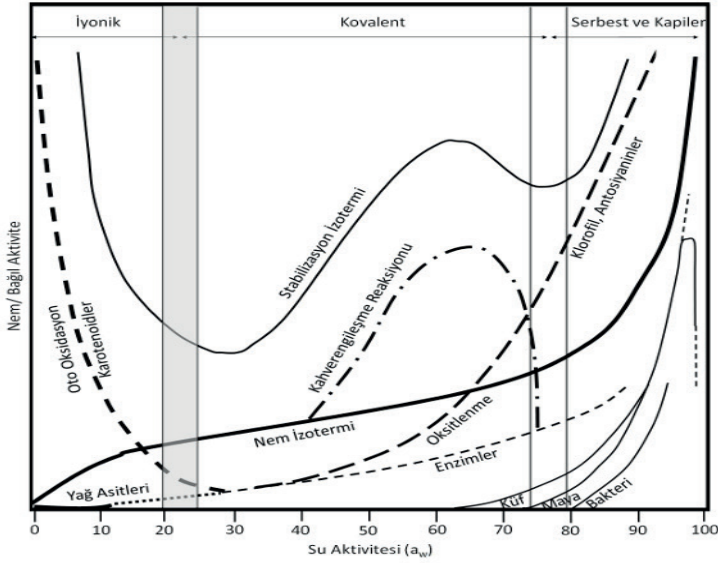
Kurutma işlemleri, nem içeriğine bağlı olarak değişen kurutma hızı gibi kinetik parametrelerle açıklanabilmektedir. Şekil 1’de gösterildiği üzere kuruma hızı eğrisi teorik olarak dört farklı bölgeye ayrılmaktadır[3,4]. Kurutma başlangıcında ürünün nem miktarı en yüksek seviyededir. Ürünün başlangıç sıcaklığına bağlı olarak proses, A veya A’ noktasından başlamaktadır. İlk aşamada (Şekil 1’de ki, 1 numaralı doğru), hem ısı hem de nem transferi artış göstermektedir. İkinci aşamada ise sabit kuruma hızı dönemi gözlenmektedir (“B-C” noktaları arası). Bu evrede (Şekil 1’de, 2 numaralı doğru), serbest halde bulunan nem yüzeyden çevreye buharlaşmakta ve kurutma hızı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Ancak uygulamada, ürünlerin düzensiz dağılımı veya homojen olmayan ısıtma gibi nedenlerden dolayı bu sabit hız bölgesi her zaman belirgin şekilde ortaya çıkmayabilmektedir. Bu süreçte nem, difüzyon mekanizması ile ürün çekirdeğinden yüzeye taşınmaktadır. Difüzyonun temel nedeni, yüzeyde meydana gelen buharlaşmanın oluşturduğu konsantrasyon farkıdır. Kurutma ilerledikçe ürünün nem miktarı azalmakta ve “kritik nem içeriği” olarak adlandırılan noktaya ulaşılmaktadır (Şekil 1’de, C noktası). Bu nokta, yüzeyden gerçekleşen buharlaşma ile iç kısımlardan yüzeye olan nem taşınımı arasındaki dengenin bozulduğu anı ifade etmektedir. Nem içeriğinin kritik seviyeye ulaşmasının ardından kurutma hızı düşmeye başlamaktadır. Bunun temel sebebi, ürün bünyesinde bağlı su miktarının serbest sudan daha fazla hale gelmesidir. Bağlı suyun hücre yapısı içerisinde veya hücre sınırlarında kimyasal bağlarla tutulması nedeniyle, bu suyun taşınması serbest suya kıyasla daha uzun sürmektedir. Taşınım genellikle hücre yapısındaki bozulmalar ve kılcal difüzyon mekanizmaları aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu nedenle “C-D” noktaları arasında gösterilen bölgede (Şekil 1’de,

3 numaralı doğru) kurutma hızında kademeli bir azalma meydana gelmektedir. İlk düşen hız döneminde ürün yüzeyindeki serbest nem büyük ölçüde uzaklaştığından yüzey neredeyse kuru hale gelmektedir. Bu aşamada bağlı nemin uzaklaştırılabilmesi için ürüne sürekli ısı verilmesi gerekmektedir. Bunun sonucunda yüzeyde sertleşme ve kabuk oluşumu meydana gelmektedir. Oluşan bu kabuk tabakası, yüzeyden çevreye gerçekleşen nem transferine ilave bir direnç oluşturmakta ve kurutma hızının daha da azalmasına neden olmaktadır. Kurutma hızındaki bu ikinci azalma evresi, “D-E” noktaları arasında gösterilen ikinci düşen hız dönemi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1’de, 4 numaralı eğri). Sabit hız döneminin; hava sıcaklığı, hava hızı ve bağlı nem gibi dış ortam koşullarından etkilenebildiği bilinmektedir. Buna karşılık düşen hız dönemi, büyük ölçüde kurutulan ürünün yapısal özellikleri ve iç mikroyapısıyla ilişkilidir [3,5]. Genel olarak, azalan hız evresinde ürün içerisinde kalan son 1/3’lük nemin uzaklaştırılması için toplam kurutma süresinin yaklaşık 2/3’ü harcanmaktadır [3,6].



Şekil 1. Nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak kurutma kinetiği[3].

Kurutma işleminin temel amacı, gıdanın içerdiği neme bağlı su aktivitesi değerini belirli bir seviyenin altına düşürerek ürünü biyolojik ve kimyasal bozulmalara karşı korumaktır. Şekil 2’de görüldüğü üzere, gıdalarda bozulmaya neden olan mikroorganizmaların gelişebilmesi belirli su aktivitesi değerlerine bağlıdır. Bakterilerin faaliyet gösterebildiği sınır yaklaşık 0,8 iken, bu değer mayalar için 0,7 ve küfler için yaklaşık 0,65 olarak ifade edilmektedir. Bunun yanında, su aktivitesi değerinin 0,6’nın altına düşmesi durumunda mikroorganizmaların faaliyetlerinin tamamen durduğu kabul edilmektedir [3,7].



Şekil 2. Su aktivitesine bağlı olarak gıdada gerçekleşen reaksiyon ve izotermi[3].

2. KURUTMA PROSESİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

2.1. İç Etkilerin Tanımlanması

Kurutma sürecinde higroskopik bir maddenin nem içeriği, çevresindeki havanın nemi ile denge durumuna ulaştığında, bu durum maddenin denge nem içeriği olarak tanımlanmaktadır. Bu koşulda ürün ne dış ortama nem verir ne de çevreden nem alır. Denge nem içeriği ile ortam havasının bağıl nemi arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler nem izotermi olarak adlandırılmaktadır. Bu eğriler, bir materyalin higroskopik davranışını incelemek ve karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca nem izotermi ürün sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir[8].

2.1.1. Efektif Difüzyon

Termal kurutma prosesinde ısı, sıcak kurutma havasından kurutulan malzeme yüzeyine doğru aktarılmaktadır. Malzeme tarafından absorbe edilen bu ısı, içeride bulunan nemin difüzyon mekanizmasıyla uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Nem transferi ilk olarak yüzeye yakın bölgelerde başlamakta, daha sonra iç kısımlardaki nemin taşınımı ile devam etmektedir. Bu difüzyon süreçleri; kapiler akış, moleküler difüzyon, Knudsen difüzyonu ve hidrodinamik akış gibi farklı fiziksel mekanizmaların etkisi altında gerçekleşmektedir[8].

2.1.2. Isıl İletkenlik

Kurutma sürecini etkileyen önemli parametrelerden biri de kurutulacak ürünün ısı iletkenlik özelliğidir. Özellikle ısı transferinin iletim yoluyla gerçekleştiği dolaylı kurutma sistemlerinde bu özellik daha kritik bir rol oynamaktadır (Tamburlu kurutucular). Gıda ürünlerinde ısı iletkenlik başlıca ürünün kimyasal bileşimine, özellikle su içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, ürünün fiziksel yapısı, gözeneklilik durumu, homojenliği, lif yapısı, maddesel durumu ve sıcaklık gibi faktörler de ısı iletkenliği etkileyen diğer önemli unsurlar arasında yer almaktadır[8].

2.1.3. Malzemenin Kimyasal Yapısı

Nem içeren katı malzemeler, farklı kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulabilmektedir. Ancak hangi kurutma tekniğinin uygun olacağı, büyük ölçüde ürünün içsel özelliklerine ve özellikle kimyasal yapısına bağlı olarak belirlenmektedir. Ürünün kimyasal bileşimi, kuruma hızını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Bileşimde meydana gelen küçük değişiklikler bile difüzyon, ısı iletkenlik ve gözeneklilik gibi kurutma davranışlarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Ayrıca denge nem içeriği gibi kuruma hızını etkileyen önemli bir parametre de malzemenin kimyasal bileşimi ile yakından ilişkilidir[8].

2.1.4. Yoğunluk ve Gözeneklilik

Gözenekli yapıya sahip ve gözenek dağılımı homojen olmayan materyallerde yoğunluk kavramı farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, yığın (bulk) yoğunluk; gözenekli bir malzemenin belirli bir hacmi içerisindeki toplam yoğunluğu ifade ederken, partikül yoğunluğu özellikle tanecikli yapıya sahip sistemlerde tek bir parçacığın yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Yığın ve partikül yoğunluğu, gıdaların termo-fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduklarından, gıda proseslerinin tasarımı, modellenmesi ve optimizasyonu açısından önemli parametreler arasında yer almaktadır. Yığın yoğunluk özellikleri, uygulanan kurutma yöntemi ve kurutma hızı ile değişkenlik gösterebilmektedir. Yavaş gerçekleştirilen kurutma işlemleri genellikle daha kompakt ve dayanıklı bir yapı oluştururken, hızlı kurutma süreçleri daha düşük yoğunluklu, çatlaklı ve gözenekli bir yapı ile sonuçlanabilmektedir. Buna karşılık partikül yoğunluğu, kurutma yönteminden bağımsız bir özellik olarak kabul edilmektedir[8].

2.1.5. Geçirgenlik

Kurutma işlemlerinde önemli bir parametre olmasına rağmen literatürde görece sınırlı yer bulan geçirgenlik, özellikle gıda sistemlerinde sıvı ve gaz fazları açısından ayrı ayrı değerlendirilmesi gereken bir özelliktir. Hidrolik geçirgenlik, basınç etkisiyle gerçekleşen akışa karşı nemli ve gözenekli bir katı yapının gösterdiği direnci ifade etmektedir. Gözenekli ve nemli gıda ürünlerinde taşınım mekanizması incelendiğinde, basınçla yönlendirilen akışın yalnızca efektif difüzyivite ile açıklanmasının yeterli olmadığı görülmektedir. Malzeme içerisindeki çok fazlı akış davranışının ayrıntılı şekilde modellenbilmesi için geçirgenlik verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bir gıda ürününün ısıya maruz kalması sırasında fiziksel ve biyokimyasal yapısında çeşitli değişimler meydana gelebilir. Bu değişimler, ürünün geçirgenlik özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle gözenekli ve nemli yapıya sahip malzemelerde çok fazlı akış davranışı incelendiğinde, geçirgenlik kavramı sıvı ve gaz fazları için ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bu kapsamda geçirgenlik, mutlak ve bağıl geçirgenlik kavramları kullanılarak tanımlanmaktadır[8].

2.2. Dış Etkilerin Tanımlanması

2.2.1. Kurutma Havası Sıcaklığı

Kurutma işlemlerinde dış çevre koşullarının etkisinin daha belirgin olduğu ilk evre, malzeme yüzeyine yakın bölgelerde serbest ve bağlanmamış suyun bulunduğu başlangıç aşamalarıdır. Kurutma havasının sıcaklığı, tüm termal kurutma yöntemlerinde kurutma hızını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Özellikle direkt kurutma sistemlerinde sıcaklık, süreç üzerinde belirleyici bir kontrol değişkeni olarak öne çıkmaktadır. Kurutma havasının termal özellikleri, ısı ve kütle transfer katsayılarını etkileyerek kuruma hızını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Sıcaklığın kurutma üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma yapılmış olup belirli bir aralıkta sıcaklığın artırılmasının kurutma kinetiğini olumlu yönde etkilediği; ancak aşırı yüksek sıcaklıkların kuruma hızında olumsuz sonuçlara yol açabildiği belirlenmiştir[8].

Çoğu araştırmada kurutma havası sıcaklığı, kabul edilebilir minimum ve maksimum sınırlar içerisinde değerlendirilmiş ve bağıl nem, basınç ve difüzyon gibi diğer değişkenlerle birlikte ele alınmıştır. Kurutulan malzemenin fiziksel yapısı ve kimyasal bileşimi dikkate alındığında, verimli kurutma için optimum hava sıcaklığı değişkenlik gösterebilmektedir. Yüksek hava sıcaklıkları kurutma sürecini hızlandırmasına rağmen, özellikle ısıya duyarlı malzemelerde yapısal bozulmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen kurutma işlemleri, özellikle gıda ürünlerinde, ürünün morfolojisinde istenmeyen değişimlere yol açabilmektedir[8].

2.2.2.Kurutma Havaasının Bağıl Nemi

Bağıl nem, havadaki gerçek buhar yoğunluğunun, aynı sıcaklıktaki doymuş buhar yoğunluğuna oranının yüzde cinsinden ifadesidir. Bu özellik genel olarak sıcaklığa bağlı olup, ayrıca malzeme yüzeyine yakın bölgelerdeki bağıl nem değeri, ürünün toplam nem içeriği ile de ilişkilidir. Özellikle kurutma sırasında ürünlerde büzülme ve deformasyon oluştuğu durumlarda bağıl nem kritik bir parametre haline gelmektedir. İlk serbest suyun uzaklaştırılmasının ardından, ürünün iç kısmı ile yüzeyi arasında belirgin nem gradyanları oluşmaktadır. Bu durum, malzeme içerisinde yüksek gerilmelerin meydana gelmesine neden olarak çatlama ve eğilme gibi yapısal bozulmalara yol açabilmektedir. Bu tür olumsuz etkilerin önlenebilmesi için nemin içeriden yüzeye kontrollü ve yavaş bir şekilde taşınması sağlanmalı ve ortamda nispeten yüksek bağıl nem değerleri korunarak ani buharlaşma engellenmelidir. Buna karşılık, büzülmenin kritik olmadığı durumlarda yapılan birçok deneysel çalışma, ortam bağıl neminin düşmesinin kuruma hızını artırdığını ortaya koymaktadır[8].

2.2.3. Kurutma Havaası Hızı

Kurutma havaasının kurutma bölgesine giriş hızı ve akış yönü, kurutma performansını etkileyen önemli dış parametreler arasında yer almaktadır. Malzeme yüzeyindeki nemin buharlaşması, büyük ölçüde sıcaklık farkı ile birlikte hava akımının oluşturduğu taşınım ısı transferi sayesinde gerçekleşmektedir. Özellikle ısı transferinin taşınım mekanizmasıyla baskın olduğu direkt kurutma sistemlerinde, hava hızının etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Literatürde yer alan birçok çalışmada, hava hızının artmasının taşınım şiddetini yükselttiği, buna bağlı olarak ısı ve kütle transferinin daha etkin gerçekleştiği ve kurutma hızının arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca konvektif ve mikrodalga destekli kurutmanın birlikte ele alındığı sayısal ve deneysel çalışmalarda, kurutma havaası hızının ısı ve kütle transfer katsayılarının değişimi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde bazı araştırmalarda tek boyutlu hava hızındaki artışın difüzyon katsayısını da yükselttiği gözlemlenmiştir[8].

2.2.4.Malzeme Şekli, Boyutu, Kurutma Ortamındaki Durumu

Kurutulacak ürünün hedeflenen nihai nem içeriğine ulaşmasında etkili olan temel faktörlerden biri, ürünün fiziksel şekli ve boyutudur. Kurutma yöntemine ve elde edilmek istenen son ürün özelliklerine bağlı olarak bazı materyaller mikron seviyesinde ya da toz formunda işlenirken, bazıları ise kübik, silindirik veya küresel gibi belirli geometrik şekillerde ve farklı kalınlık ile derinliklere sahip olacak şekilde kurutulmaktadır. Bir ürünün farklı boyutları için kurutma süreci değerlendirildiğinde, örneğin elmanın kurutulması ele alındığında, daha küçük parçaların büyük parçalara kıyasla çok daha hızlı kuruduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bazı ürünlerde aşırı

küçültme, istenmeyen kuruluk seviyelerine ve aşırı sertleşmeye yol açabileceğinden, ürün boyutunun dikkatli şekilde belirlenmesi gerekmektedir[8].

Ayrıca kullanılan kurutma yönteminin de ürünün şekil ve boyutu üzerinde belirleyici etkisi bulunmaktadır. Örneğin püskürtmeli kurutucularda genellikle sıvı hammaddelerden toz formda ürünler elde edilirken akışkan yataklı kurutucularda daha çok toz veya ince taneli partiküller işlenmektedir. Buna karşılık tepsili, solar veya konveyörlü kurutucularda belirli boyutlarda dilimlenmiş ya da kalıplanmış ürünler kurutulmaktadır[8].

Tablo 1’de, güneş enerjisi kullanılarak kurutulan bazı tarımsal ürünlere ait başlangıç nem oranları ile kurutma işlemi sonundaki nem değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca tabloda, kurutma sürecinde uygulanan kurutma sıcaklıkları, işlem sırasında üründen uzaklaştırılan su miktarı (kg/t) ve kurutma işlemi için ihtiyaç duyulan toplam enerji gereksinimi ($\text{kJ/t} \times 10^6$) gibi temel parametreler yer almaktadır[9]. Bu veriler, güneş enerjili kurutma uygulamalarında ürün türüne bağlı olarak nem giderme kapasitesinin ve enerji tüketiminin önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, kurutma sıcaklığı ve uzaklaştırılan su miktarı gibi faktörler, sistemin genel verimliliğini doğrudan etkileyen kritik performans göstergeleri olarak değerlendirilmektedir.

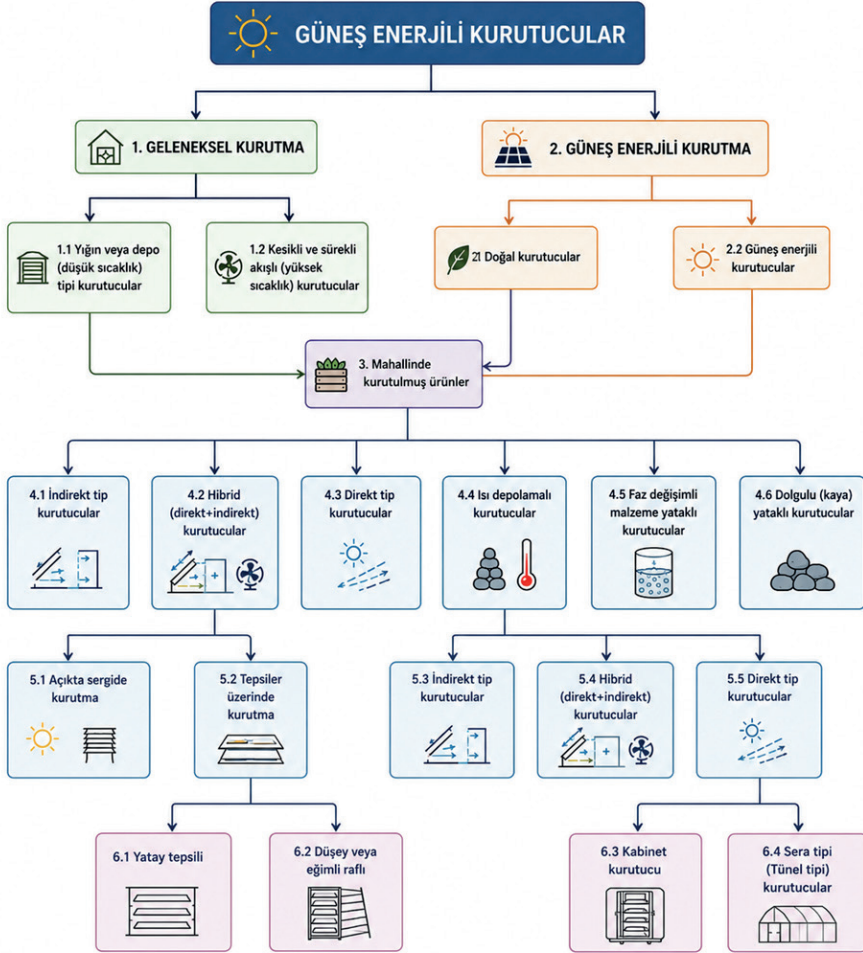
Tablo 1. Ürünlere göre kurutma şartları [9].

Ürün adı	Nemlilik (yaş esas) (%)		Maksimum kurutma sıcaklığı (°C)	Buharlaştırılan su (kg/t)	Enerji gereksinimi (kJ/(t x10 ⁶))
	Başlangıç	Son			
Elma	80	24	70	736,8	1,502
Kayısı	85	18	65	817,1	1,666
Muz	80	15	70	823,5	1,679
Lahana	80	4	55	791,7	1,614
Havuç	70	5	75	684,2	1,365
Manyok (Cassava)	62	17	–	542,2	1,105
Karnabahar	80	6	65	787,2	1,605
Kırmızı biber	80	5	65	789,5	1,610
Kakao çekirdeği	50	7	–	462,4	0,943
Kahve çekirdeği	55	12	–	488,6	0,996
Kahve	50	11	–	438,6	0,695
Kozalaklı ağaç	30-40	10-15	50	222,2 - 294,1	0,453 - 0,600
Mısır	24	14	50	116,3	0,237
İncir	80	24	–	736,8	1,502
Balık	75	15	30	705,9	1,439
Yeşil yapraklı ağaçlar	25-35	17-20	50	96,4 - 187,5	0,197 - 0,382
Sarımsak	80	4	55	791,7	1,674
Üzüm	80	15-20	70	750,0 - 623,5	1,529 - 1,679
Yeşil fasulye	70	5	75	664,2	1,395
Yeşil bezelye	80	5	65	789,5	1,610
Yer fıstığı	40	9	50	340,6	0,694
Guava (Hintarmudu)	80	7	65	784,9	1,600
Soğan	80	4	55	791,7	1,614
Şeftali	85	18	65	817,1	1,666
Ananas	80	10	65	777,8	1,586
Patates	75	13	75	712,6	1,453
Erik	85	15	55	823,5	1,769
Çeltik	24	11	50	146,1	0,298
İspanak	80	10	–	777,8	1,566
Tatlı patates	75	7	75	731,2	1,491
Buğday	20	16	45	47,6	0,097

3.GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLİ KURUTUCULARIN SINIFLANDIRILMASI

Kurutucular farklı kriterlere göre çeşitli biçimlerde sınıflandırılabilir. Ancak uygulamada en yaygın ve kullanışlı iki temel sınıflandırma yaklaşımı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, ısıнын ıslak katı malzemeye hangi mekanizma ile aktarıldığına dayanan sınıflandırmadır. İkincisi ise, kurutulacak malzemenin kullanım şekli, fiziksel yapısı ve özellikleri dikkate alınarak yapılan sınıflandırmadır. Isı transfer esaslı sınıflandırma, kurutucu tasarımında ve işletme koşullarında önemli farklılıkların ortaya çıktığını göstermesi açısından önem taşırken; malzeme özelliklerine dayalı sınıflandırma yöntemi ise belirli bir kurutma problemi için ön değerlendirme yapılarak uygun kurutucu tipinin seçilmesinde daha işlevsel bir yaklaşım sunmaktadır[9]. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda kurutma sisteminin belirlenmesinde her iki yaklaşım birlikte değerlendirilmelidir.

Isı transfer mekanizmasına göre yapılan kurutucu sınıflandırmaları şekil 3'te verilmiştir [9]. Bu sınıflandırma kapsamında kurutucular, ısıнын doğru- dan veya dolaylı olarak aktarılmasına bağlı şekilde ayrılmakta; ayrıca işletme biçimine göre sürekli veya kesikli (batch) çalışma prensibine sahip alt gruplara bölünmektedir. Böylece kurutma sürecinde kullanılan enerji kaynağı ve ısı iletim yolu, sistemin verimliliğini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle sürekli çalışan sistemler büyük ölçekli üretimlerde tercih edilirken, kesikli sistemler daha küçük kapasite veya esnek üretim gerektiren uygulamalarda avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3. Kurutucuların Sınıflandırılması[9].

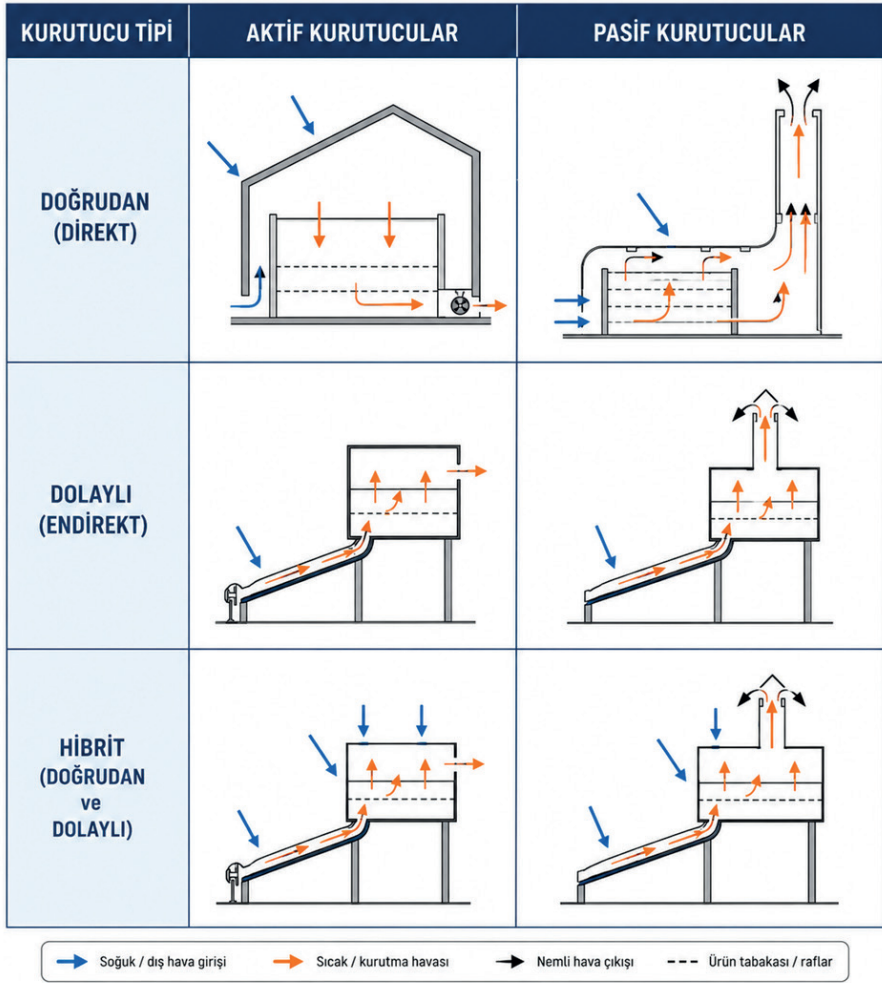
Güneş enerjisi ile çalışan kurutma sistemleri ise genel olarak doğrudan (direkt), dolaylı (endirekt) ve hibrit (direkt + endirekt) güneş enerjili kurutucular olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu kurutucuların çalışma prensibi temel olarak güneş enerjisinin hangi yöntemle toplandığına ve bu enerjinin kurutma işlemi için kullanılabilir ısı enerjisiye nasıl dönüştürüldüğüne bağlıdır. Bu durum Şekil 4'te şematik olarak gösterilmektedir. Ayrıca güneş enerjisi kurutucularında tasarım kriterleri; ortam sıcaklığı, güneşlenme süresi, hava akış hızı ve kurutma odasının yapısal özellikleri gibi birçok parametreden etkilenmektedir.

Literatürde, güneş enerjili kurutma sistemleri temel olarak ısıtma modlarına ve güneş enerjisinin sisteme dâhil edilme biçimine göre sınıflandırılmaktadır. Bu kapsamda sistemler geniş anlamda iki ana grupta ele

alınmaktadır[100]. Bunlar pasif güneş enerjili kurutma sistemleri ve aktif güneş enerjili kurutma sistemleri olarak bilinmektedir. Pasif sistemler genellikle doğal hava sirkülasyonuna dayalı olup, geleneksel anlamda doğal taşınım ile çalışan güneşli kurutucular olarak tanımlanmaktadır. Aktif sistemler ise çoğunlukla fan, üfleyici veya yardımcı ısıtıcı gibi ekipmanlar içerdiğinden, daha kontrollü bir kurutma ortamı sağlayabilmekte ve bu nedenle birçok uygulamada hibrit güneş kurutucuları olarak da adlandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, kurutma sürecinde enerji yönetimi açısından önemli bir değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Aktif veya pasif güneş enerjili kurutma sistemleri kendi içerisinde üç alt sınıfa ayrılmaktadır: doğrudan tip güneş enerjili kurutucular, dolaylı tip güneş enerjili kurutucular ve hibrit güneş enerjili kurutucular'dır.

Doğrudan tip sistemlerde güneş ışıınımı doğrudan kurutma kabine girerek ürün üzerinde etkili olurken, dolaylı tip sistemlerde güneş enerjisi bir kolektörde toplanarak hava ısıtılır ve daha sonra bu sıcak hava kurutma odasına yönlendirilir. Hibrit sistemler ise her iki yöntemi birleştirerek hem doğrudan ışıınım hem de ön ısıtılmış hava desteği ile daha yüksek verimlilik sağlamayı hedeflemektedir. Bu tür sistemler özellikle değişken iklim koşullarında kurutma performansının sürekliliği açısından avantajlıdır.

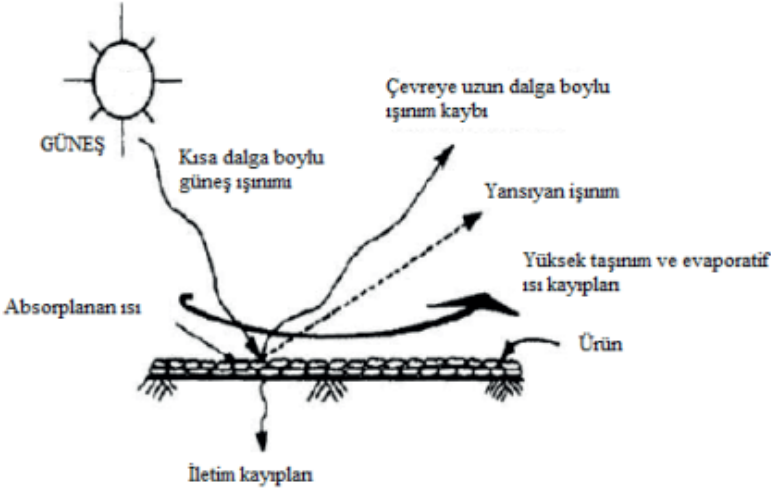


Şekil 4.Kurutucu Tasarımları[9].

Bazı yaklaşımlara göre, farklı güneş kurutucu sınıflarının tipik tasarımlarına ait temel özellikler şekil 4'te sunulmuş olup, kullanılan enerji kaynaklarına bağlı olarak güneş kurutucularının üç ana grupta toplandığı görülmektedir. Güneş enerjisi kurutucularının tasarımı, yalnızca enerji kaynağının türüne göre değil; aynı zamanda kurutulacak ürünün miktarı, ürünün fiziksel ve biyolojik karakteristikleri, nem içeriği ve kurutma davranışı gibi faktörlere göre de şekillendirilmektedir[100]. . Bu nedenle, farklı ürünlere ve kapasitelere uygun çok sayıda güneş enerjili kurutucu tasarımı geliştirilmiş ve günümüzde bu sistemlerin çeşitli tipleri yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca sürdürülebilir tarım ve enerji verimliliği açısından güneş enerjili kurutma teknolojileri, son yıllarda giderek daha fazla araştırma ve uygulama alanı bulmaktadır.

3.1 Açıkta Güneş Enerjili Kurutma

Yalnızca güneş enerjisinden yararlanılarak gerçekleştirilen açıkta güneşte kurutma yönteminin temel çalışma prensibi şematik olarak şekil 5’ te verilmiştir. Bu yöntemde kurutulacak tarımsal ürünler genellikle gün boyunca yüksek miktarda kısa dalga boylu güneş ışınımı alabilen yüzeylere (toprak zemin, tekstil sergiler veya çimento alanlar gibi) serilmekte ve doğal hava akımı etkisi altında kurutulmaya bırakılmaktadır. Böylece ürünler, hem güneş ışınımına hem de çevresel rüzgâr hareketlerine doğrudan maruz kalmaktadır.



Şekil 5. Açıkta güneş enerjili kurutucu [9].

Güneşten gelen ışımanın bir bölümü yüzeyden yansıtılırken, geri kalan kısmı ürünün rengine ve yüzey özelliklerine bağlı olarak emilmektedir. Emilen bu radyasyon enerjisi zamanla ısı enerjisiye dönüşerek ürünün sıcaklığının artmasına neden olur. Ürün sıcaklığındaki bu artış, bünyedeki nemin buharlaşmasını hızlandırarak kurutma işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Ancak sistemde yalnızca ısı kazanımı değil, aynı zamanda önemli enerji kayıpları da söz konusudur. Özellikle ürün yüzeyinden çevreye doğru gerçekleşen uzun dalga boylu radyasyon kayıpları ve rüzgâr etkisiyle meydana gelen konvektif ısı kayıpları kurutma verimini düşüren temel faktörler arasında yer almaktadır.

Açıkta güneşte kurutma yöntemi herhangi bir yardımcı enerji kaynağına ihtiyaç duymadığı için en düşük maliyetli kurutma yöntemlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Süreç tamamen çevresel koşullara bağımlıdır ve güneş enerjisi dışında ek bir enerji girdisi bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yöntemin önemli sınırlamaları bulunmaktadır. Kurutma işlemi kontrolsüz koşullarda gerçekleştiğinden ürünler; toz, böcek, kuş, yağmur ve diğer

çevresel kirleticilere açık hale gelmekte, bu durum hem hijyen hem de kalite açısından ciddi problemler oluşturabilmektedir. Ayrıca sıcaklık ve nem koşullarının kontrol edilememesi nedeniyle kurutma süresi uzamakta ve ürün kalitesinde homojenlik sağlanamamaktadır.

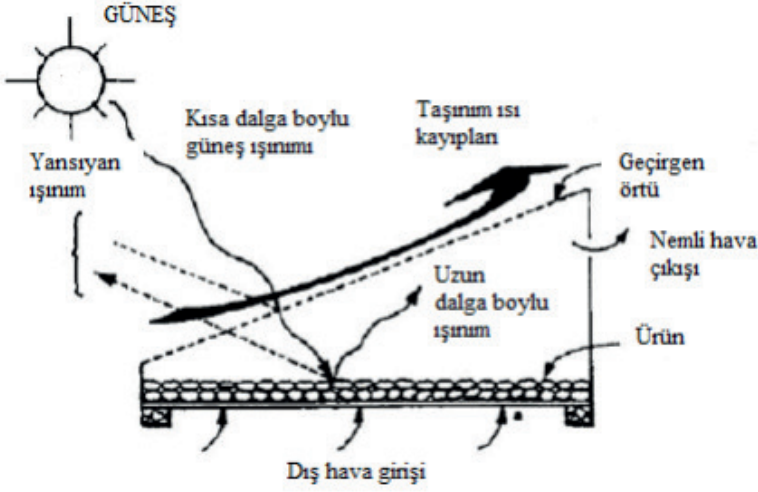
Bu nedenle açıkta güneşte kurutulan ürünlerin çoğu zaman istenen kalite standartlarını karşılamadığı ve özellikle uluslararası pazarda kabul edilebilir ürün kalitesi sağlayamadığı ifade edilmektedir. Kurutma sırasında meydana gelen renk değişimi, besin değerinde azalma ve mikrobiyal bozulma riski, bu yöntemin ticari kullanımını sınırlandıran başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Açıkta kurutma yöntemindeki bu yetersizliklerin fark edilmesiyle birlikte, tarımsal ürünlerin kurutulmasında güneş enerjisinden daha verimli ve kontrollü yararlanmayı amaçlayan sistemler geliştirilmiş ve bu yaklaşımlar genel olarak “güneş enerjili kurutucular” olarak adlandırılmaya başlanmıştır. Bu sistemler, kurutma sürecini çevresel etkilerden kısmen izole ederek hem daha yüksek kalite hem de daha güvenilir kurutma performansı sağlamayı hedeflemektedir.

3.2 Doğrudan (Direkt) Güneş Enerjili Kurutma

Doğrudan güneş enerjili kurutma yöntemi, tarımsal ürünlerin güneş ışınımına doğrudan maruz bırakılarak kurutulduğu sistemleri ifade etmekte olup literatürde genellikle güneş enerjili kabin tipi kurutucu olarak da tanımlanmaktadır. Bu sistemin temel çalışma prensibi şekil 6’ da şematik olarak verilmiştir.

Direkt kurutucularda güneşten gelen kısa dalga boylu radyasyon, kurutma kabininin şeffaf yüzeyinden iç ortama geçerek doğrudan ürün yüzeyine ulaşmakta ve ürün tarafından emilerek ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Böylece kabin içerisindeki hava sıcaklığı artmakta ve ürün içerisindeki nemin buharlaşması hızlanmaktadır. Bu sistemlerde kurutma işlemi sırasında nemin uzaklaştırılması, doğal veya zorlanmış hava hareketi ile gerçekleşmektedir. Taze hava genellikle kabinin alt kısmından içeri girmekte ve ürün yüzeyinden geçerken nemi bünyesine alarak yukarı doğru hareket etmektedir. Nemle doygun hale gelen hava ise kabinin üst kısmında bulunan çıkış açıklığından dış ortama atılmaktadır. Bu hava dolaşımı sayesinde kabin içerisinde sürekli bir nem transferi sağlanmakta ve kurutma işlemi belirli bir süre içerisinde tamamlanmaktadır.

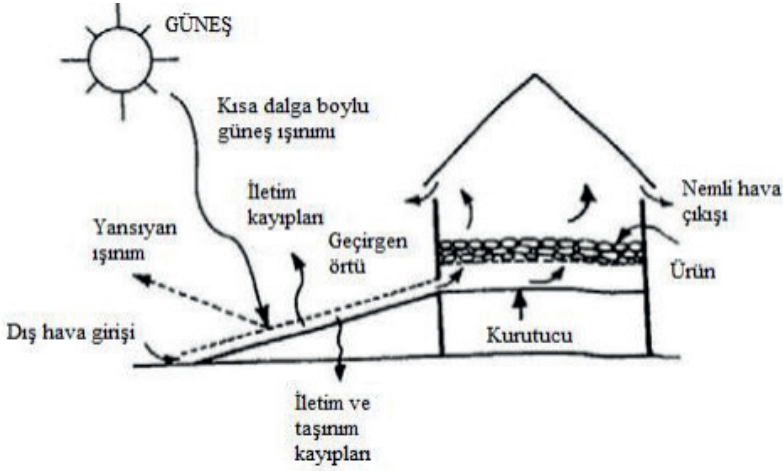
Doğrudan güneşli kurutucular, yapısal olarak basit olmaları ve düşük maliyetle kurulabilmeleri nedeniyle özellikle küçük ve orta ölçekli uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, sistem performansı güneş ışınımı şiddetine ve çevresel koşullara bağlı olduğundan kurutma sürecinde sıcaklık dalgalanmaları meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, kabin içindeki hava akışının düzenlenmesi ve uygun havalandırma açıklıklarının tasarlanması, ürün kalitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 6. Direkt güneş enerjili örnek bir kabin tipi güneşli kurutucu[9].

3.3 Dolaylı (Endirekt) Güneş Enerjili Kurutma

Dolaylı (endirekt) güneş enerjili kurutma sistemleri, ısı transfer mekanizması ve buharın uzaklaştırılma şekli bakımından doğrudan (direkt) güneşli kurutuculardan belirgin şekilde ayrılmaktadır. Şekil 7 'de dolaylı güneş enerjili kurutma sisteminin çalışma prensibi şematik olarak açıklanmıştır. Bu tip kurutucularda ürünler, doğrudan güneş ışınımına maruz kalmayacak şekilde opak bir kurutma kabini içerisinde, tepsiler veya raflar üzerinde yerleştirilmektedir. Böylece kurutma işlemi daha kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7. Dolaylı güneş kurutma sisteminin çalışma prensibi[9].

Dolaylı güneşli kurutucularda sistemin temel bileşenlerinden biri güneş kolektörü olarak adlandırılan ünedir. Bu ünite genellikle hava akışkanlı bir güneş toplayıcısı şeklinde tasarlanmakta olup, dış ortamdan alınan havanın güneş enerjisi yardımıyla ısıtarak kurutma kabineine gönderilmesini sağlamaktadır. Kolektörde ısınan hava, belirli bir sıcaklığa ulaştıktan sonra kurutma odasına yönlendirilmekte ve burada kurutulacak nemli ürünlerin içinden veya üzerinden geçirilerek nemin uzaklaştırılması amaçlanmaktadır[9].

Isıtılmış hava ile ürün yüzeyi arasında gerçekleşen konvektif (taşınım) ısı transferi, ürün içerisindeki nemin buharlaşmasına neden olmaktadır. Kurutma işlemi esas olarak, yaş ürün yüzeyi çevresindeki hava ile kurutma havası arasındaki nem konsantrasyonu farkı sayesinde meydana gelmektedir. Bu nem farkı, kütle transferini artırarak ürün bünyesindeki suyun buharlaşarak ortam havasına geçmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, nem yükü artan hava kabin çıkışından dış ortama atılmakta ve sistemde sürekli bir nem uzaklaştırma döngüsü oluşmaktadır[9].

Dolaylı güneşli kurutma sistemlerinin çeşitli avantajları bulunmaktadır. Öncelikle bu sistemler, kurutma sıcaklığı ve hava akışı gibi parametrelerin daha iyi kontrol edilmesine olanak sağladığından, elde edilen ürünün kalite düzeyi genellikle daha yüksektir. Ayrıca ürünler doğrudan güneş ışınımına maruz kalmadığı için özellikle bitkisel ürünlerde görülebilen karamelizasyon, renk koyulaşması ve lokal sıcaklık kaynaklı doku hasarı gibi olumsuz etkiler büyük ölçüde önlenmektedir. Bunun yanında sistem, derin tabaka kurutma uygulamalarında ihtiyaç duyulan daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılabildiğinden, kurutma süresinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle ışığa duyarlı ürünler açısından dolaylı kurutucular tercih edilmekte ve bu ürünlerde besin değerinin korunması açısından önemli bir avantaj

oluşturmaktadır. Ayrıca dolaylı sistemlerin, doğrudan güneşli kurutma yöntemlerine kıyasla daha yüksek verim elde etme potansiyeline sahip olduğu da belirtilmektedir[9]. .

Bununla birlikte dolaylı güneşli kurutma sistemleri, daha karmaşık yapıda oldukları için genellikle daha yüksek başlangıç yatırım maliyeti gerektirmektedir. Kolektör, hava kanalları ve kurutma kabini gibi ek ekipmanların bulunması, sistemin hem kurulum hem de bakım giderlerini artırmaktadır. Bu nedenle, dolaylı güneş kurutucular her ne kadar daha kaliteli ve kontrollü kurutma imkânı sunsa da ekonomik açıdan değerlendirme yapılması gereken daha detaylı sistemler olarak kabul edilmektedir.

3.4 Hibrit Güneş Enerjili Kurutma

Hibrit güneş enerjili kurutucular, doğrudan (direkt) ve dolaylı (endirekt) güneşli kurutma sistemlerinin avantajlarını bir araya getiren kurutma teknolojileri olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerde hem güneş ışınımının ürün üzerine doğrudan etkisi hem de güneş kolektörü aracılığıyla ısıtılan havanın kurutma kabine aktarılması birlikte kullanılarak kurutma sürecinin daha verimli yürütülmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle hibrit kurutucular, güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmayı hedefleyen daha gelişmiş kurutma sistemleri arasında yer almaktadır. Hibrit sistemlerde kurutma için gerekli ısı enerjisi, iki farklı kaynaktan sağlanmaktadır. Birincisi, kurutma kabini içerisine giren güneş ışınımının ürün yüzeyinde oluşturduğu doğrudan ısıtma etkisidir. İkincisi ise güneş enerjisi kolektöründe önceden ısıtılan havanın kurutma odasına yönlendirilmesiyle elde edilen konvektif ısı transferidir. Böylece ürün hem radyasyonla hem de sıcak hava akımıyla eş zamanlı olarak ısıtılmakta ve bu durum nemin daha hızlı buharlaşmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle hava koşullarının değişken olduğu bölgelerde hibrit kurutucular, daha kararlı ve kontrollü bir kurutma performansı sunabilmektedir. Hibrit güneşli kurutma sistemleri, yalnızca kurutma süresini kısaltmakla kalmayıp aynı zamanda ürün kalitesinin korunmasına da yardımcı olmaktadır. Kurutma süresinin azalması, ürünün mikrobiyolojik bozulmaya maruz kalma süresini düşürmekte ve daha güvenli bir kurutma süreci sağlamaktadır. Ayrıca sistemde sıcaklık ve hava akışı daha iyi kontrol edilebildiğinden, kurutma sonunda elde edilen ürünün nem dağılımı daha homojen olabilmektedir.

Şekil 8’de, Ege Üniversitesi’nde yürütülen bir çalışmada test edilen hibrit güneş enerjili kurutucu örneği gösterilmektedir. Bu tür uygulamalar, hibrit sistemlerin pratikte kullanılabilirliğini ortaya koymakta ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında güneş enerjisinin daha etkin değerlendirilmesine yönelik önemli bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 8. Ege Üniversitesi'nde tasarlanmış hibrit tip, pasif bir kurutucu[9].

Güneş enerjili kurutucuların kullanımındaki engellerden belki de en önemlisi kurutma işlemi yalnızca güneş ışınımının yüksek olduğu saatlerde gerçekleştirilebilmesidir. Bu nedenle güneş enerjili kurutucuların kullanımının artırılması için kurutucu üniteler ve termal depolama sistemleri kullanılarak yeni teknolojiler geliştirilmektedir.

Literatürde farklı tip ayçiçeği tohum kurutucuları incelendiğinde, zorlamalı konveksiyonlu güneş enerjili kurutucu da makinesinin yatağı eğikken ayçiçeği tohumları farklı açılarda ve farklı frekanslarda salınım meydana gelmiştir. Fiziksel modelin matematiksel ve deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Kurutucu için ortalama hata ve standart sapma termal verimlilik sırasıyla %0,78 ve %1,33 olarak gerçekleştiği görülmüştür[10].

Güneşte kurutma; direkt ve dolaylı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak güneşin altında direkt kurutma yapıldığında materyal, yağmur, esen rüzgâr, böcek istilası, insan ve hayvan istilası gibi birçok olumsuzluklara maruz kalmaktadır. Oysaki dolaylı tip güneş kurutucuları ile ürünlerin kirlenmesine yol açan parazit vb. diğer sorunlar ortadan kaldırılabilir. Ancak bu tip kurutucularda enerji maliyetleri, kuruma havası sıcaklığının sabit olmamasından kaynaklı geç kuruma veya fazla sıcaklık nedeni ile tohumlar canlılığını yitirmektedir.



Şekil 9. Trakya Üniversitesi'nde tasarlanmış yeni nesil hibrit enerjili tohum kurutucu

Tohum kurutmada ideal şartların sağlanması amacıyla Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde tasarladığımız yeni nesil hibrit kurutucu ve otomasyon sistemi şekil 9 da verilmiştir. Bu yeni nesil hibrit kurutucuda, özellikle yaz aylarında sadece güneş enerjisinden elde edilen elektrik ile tohumlar kurutulmaktadır. Güneş ışınımının yetersiz olduğu günlerde ise kurutucu üzerindeki akülerde depolanan elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Her iki enerjinin tükendiği durumda ise şebeke elektriği kullanılarak kurutma prosesine devam edilmektedir. Tasarladığımız sistemde sıcaklık kontrollü bir otomasyon sistemi ile kurutma prosesinde tohumların canlılık oranının yüksek tutulması sağlanarak; tarımda verim, sürdürülebilirlik ve milli anlamda da değer yaratacak bir prototip makine geliştirilmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada kurutma prosesine etki eden iç ve dış faktörler incelenmiş, güneş enerjili kurutucular açıkta kurutma, direkt, dolaylı ve hibrit sistemler şeklinde sınıflandırılarak çalışma prensipleri değerlendirilmiştir. Kurutma verimi ve ürün kalitesinin; nem içeriği, denge nem durumu, efektif difüzyon hızı, ısı iletkenlik, yoğunluk-gözeneklilik ve geçirgenlik gibi malzeme özellikleri ile sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı gibi çevresel parametrelerin ortak etkisi altında şekillendiği görülmüştür. Bu nedenle kurutma sistemlerinin tasarımında yalnızca enerji kaynağı değil, aynı zamanda ürünün termofiziksel yapısı ve çevresel şartların değişkenliği de dikkate alınmalıdır. Açıkta güneşte kurutma yöntemi düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir yöntem olmasına rağmen hijyen, çevresel kirlenme, kontrolsüz sıcaklık-nem koşulları ve uzun kuruma süresi gibi nedenlerle ürün kalitesi açısından önemli sınırlılıklar taşımaktadır. Direkt güneş enerjili kurutucular daha korunaklı bir ortam sağlasa da güneş ışınımındaki değişkenlik nedeniyle kabin içi sıcaklık dalgalanmaları oluşabilmektedir. Dolaylı güneşli kurutucular ise sıcaklık ve hava akışı kontrolünü daha iyi sağlayarak özellikle ışığa duyarlı ürünlerde kalite kayıplarını azaltmakta, ancak daha karmaşık yapıları nedeniyle yatırım maliyetini artırmaktadır.

Hibrit güneş enerjili kurutucular, hem direkt ışınlama etkisini hem de kolektör destekli sıcak hava kullanımını bir arada sunarak daha verimli ve daha kısa süreli kurutma imkânı sağlamaktadır. Ayrıca enerji sürekliliğinin sağlanabilmesi, hibrit sistemlerin değişken iklim koşullarında daha güvenilir bir seçenek olmasına katkı sunmaktadır. Bu kapsamda Trakya Üniversitesi'nde geliştirilen yeni nesil hibrit tohum kurutucu; güneş enerjisinden elektrik üretimi, akü destekli enerji depolama ve gerektiğinde şebeke destekli çalışma prensibi ile kesintisiz bir kurutma süreci sağlayabilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle tohum gibi hassas ürünlerde sıcaklık kontrollü otomasyon sayesinde canlılık oranının korunmasına olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak güneş enerjili kurutma sistemleri, doğru tasarım ve kontrol stratejileriyle tarımsal ürünlerin kurutulmasında çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Özellikle hibrit sistemlerin yaygınlaştırılması, ürün kalitesini artırmanın yanı sıra kurutma sürecini çevresel etkilerden daha bağımsız hale getirerek tarımsal üretimde verimlilik ve güvenilirliği güçlendirebilecek önemli bir teknolojik gelişme olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]-Memur, E. (2022). Güneş Enerjili Gıda Kurutucusu Tasarımı ile Kurutma Performans Değerlendirmeleri. *Yekarum*, 7(2), 48-57.
- [2]-Polatçı, H., Taşova, M., Saraçoğlu, O. (2020). “Armut (*Pirus communis* L.) Posasının Bazı Kalite Değerleri Açısından Uygun Kurutma Sıcaklığının Belirlenmesi”, *Akadamik Platform Mühendislik ve Bilim Dergisi*, 8(3), 540-546.
- [3]-Keleşoğlu, A. (2025). Infrared, mikrodalga ve vakum teknolojilerini içeren hibrit gıda kurutucu geliştirilmesi. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [4]-Khan, M. I. H., Batuwatta-Gamage, C. P., Karim, M. A., & Gu, Y. T. (2022). Fundamental Understanding of Heat and Mass Transfer Processes for Physics-Informed Machine Learning-Based Drying Modelling. *Çinde Energies* (C. 15, Sayı 24).
- [5]-Bertin, R., Delage, P., & Bovfrif, S. (1983). Estimation Of Functions In Drying Equations. *Çinde Drying Technology*.
- [6]-Scaman, C. H., Durance, T. D., Drummond, L., & Sun, D. W. (2014). Combined Microwave Vacuum Drying. *Çinde D.-W. Sun (Ed.), Emerging Technologies for Food Processing*
- [7]-Akbal, N., & Vural, A. (2018). Kurutulmuş Meyve Örneklerinde Mikrobiyolojik Kalite Özelliklerinin Araştırılması. *Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 11(2), 93-97.
- [8]-Çoban, Ö.S. (2022).Konveyörlü Bir Kurutucuda Farklı Geometrik Şekillere Sahip Gözenekli Yapıların Kurutma Kinetiğinin Sayısal Analizi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [9]-Güngör, A., Özbalta, N. (2019). Güneş Enerjili Kurutma Teknolojileri Ve Uygulamalarda Gelişmeler, 8. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Mersin.
- [10]-Phadke, P. C., Walke, P. V., & Kriplani, V. M. (2015). A review on indirect solar dryers. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(8), 3360-3371.



ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN LİTYUM- İYON BATARYALARIN ŞARJ STRATEJİLERİ

“ ”

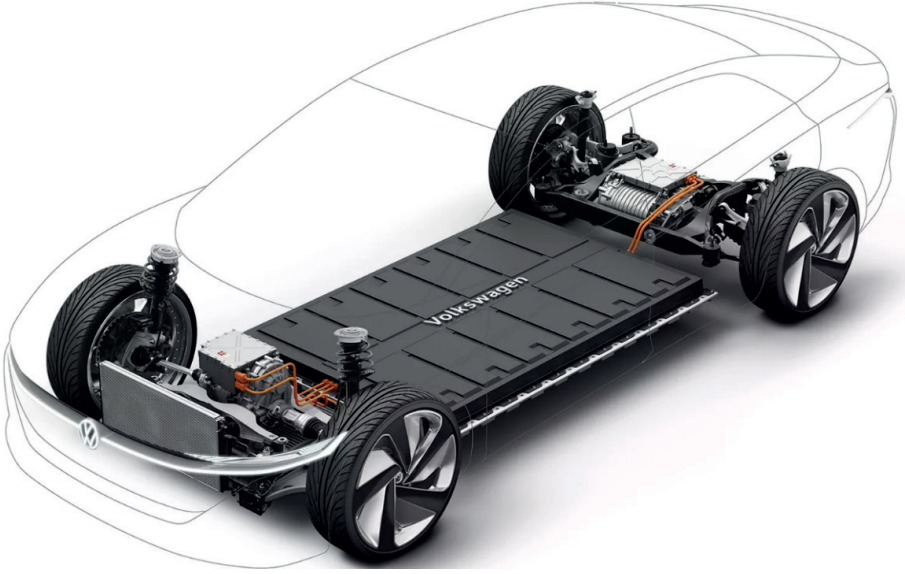
Haluk Güneş¹
Mehmet Akif KUNT²

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı, Kütahya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0915-0924)

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı, Kütahya, Türkiye (ORCID: 0000-0001-5710-7253)

1. Giriş

Son yıllarda Elektrikli araçların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bunun en temel sebebi hiç kuşkusuz düşük maliyet ile ulaşım ve taşımacılık sorununu çözmesidir. Elektriğin fosil yakıtlara oranla ucuz olması böyle bir avantajı kullanıcılara sağlamaktadır. Aynı zamanda düşük vergi oranları da ilk alım maliyetini azaltmaktadır. Kullanım esnasında sessiz olması ve emisyon üretmemesi de çevre kirliliğinin önüne geçmektedir. Bu özelliği ile, önümüzdeki yıllarda daha da sıkı olması beklenen Avrupa emisyon standartlarına uyumludur. Uzun süre bakım gerektirmeyen bir güç ünitesi ve bileşenleri ile kullanıcılar açısından memnun edicidir. Bakım esnasında daha düşük maliyet ile uzun kilometreler yapabilen bir taşıt özelliğine de sahiptir. İster evden yavaş ve düşük maliyet ile ister halka açık şarj istasyonlarından hızlı ama yüksek maliyet ile şarj edilebilmektedir. Her iki durumda da içten yanmalı motorlu taşıtlara göre daha ekonomiktir.



Şekil 1. *Volswagen markasına ait bir elektrikli aracın alt yapı görüntüsü (Volkswagen Türkiye, t.y.)*

Elbette Elektrikli araçların sahip olduğu dezavantajlar da bulunmaktadır. Öncelikle bu araçlar taşıdıkları büyük lityum iyon tabanlı bataryalar yüzünden yanma tehlikesi ile karşı karşıyadır. Günümüzde özellikle şarj esnasında aşırı ısınma sonucu yanma olayları ile gündeme geldikleri bilinmektedir.

Bunun yanı sıra klasik bir içten yanmalı taşıt kullanan araç sahiplerinin menzil konusunda özgürlükleri elektrikli araç sahipleri için önemli bir dezavantajdır. Çünkü bataryaların şarj olma süreleri genellikle uzundur ve dolu bir batarya ile gidilecek mesafe bellidir. Şarjın bitmesi ve tekrar doldu-

rulması zaman alacağı için kullanıcılar iyi bir planlama yaparak yola çıkmalıdır. Oysaki içten yanmalı motorlu araçlar istediği zaman yola çıkıp istediği kadar yol alabilirler. Sonuçta depo boşalsa bile hızlı bir şekilde yaygın petrol istasyonları sayesinde depo dolumu yaparak yola devam edebilirler. Elektrikli araçlarda ise bazen iyi planlansa bile yol esnasında birçok olumsuzluğun olabileceği unutulmamalıdır. Bunların başında yaygın olmayan şarj ağı ve sürekli çoğalan elektrikli araç sayısı yüzünden uzun süre şarj etmek için beklemler gelmektedir. Özellikle ülkenin genel tatil günlerinde yollarda artan araç yoğunluğu bu durumu daha da kötüleştirmektedir.



Şekil 2. Trugo ve Tesla Supercaharger (OGGUSTO, 2025), (Trugo, t.y.)

Belirli şarj şirketlerinin kaliteli hizmet vermesi dışında birçok şarj istasyonunda düşük güçte şarj üniteleri yüzünden araçlar desteklese bile en yüksek güçte şarj yapılamamaktadır. Trugo, ZES ve Tesla Supercharger bu konuda en başarılı şarj cihazları ile hizmet verdiği bilinmektedir. Ayrıca Eşarj ve En yakıt gibi kaliteli şarj istasyonları da mevcuttur.

2. Lityum tabanlı bataryaların arasındaki farklar

Elektrikli araç üreticileri genellikle ucuz olması ve uzun yıllar üretim tecrübesine sahip oldukları Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit, (LiNiMnCoO_2) katot, grafit anot olan kısa adı NMC ile Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit, LiNiCoAlO_2 katot, grafit anot ve kısa adı NCA pilleri yaygın olarak kullanmaktadır. Bunların yanı sıra Lityum Demir Fosfat LiFePO_4 katot, grafit anot ve kısa adı LFP olan bataryalar da kullanılmaya başlanmıştır. Bir başka lityum tabanlı pil olarak katı hal bataryaları da elektrikli araçlar için gündemdedir. Ancak bu piller henüz geliştirme aşamasında olup seri üretimde olan bir araçta kullanılmamıştır. Bu son iki batarya lityum iyon göre daha güvenlidir. Bunlarda yanma riski neredeyse yok denecek kadar azdır. Ancak LiFePO_4 bataryalar lityum iyon göre daha ağır, daha büyük ve enerji yoğunluğu daha azdır. Katı hal bataryaları daha küçük ve daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olmalarına karşın fiyatları oldukça yüksektir. Bu durum onların kısa zaman içerisinde elektrikli araçlarda kullanımını zorlaştırmaktadır. Gelecekte maliyetlerin ucuzlaması bataryalarda yeni teknolojileri ortaya çıkaracaktır.

Tablo 1’de NMC, NCA ve LFP bataryaların tipik özellikleri karşılaştırılmıştır (Battery University, t.y.). Bu tabloda katı hal bataryalarına yer verilmiştir. Bunun sebebi henüz geliştirme aşamasında olmalarıdır. Tablo incelendiğinde NMC ve NCA’lar daha düşük bir şarjdeşarj döngüsüne sahiptir. Aynı zamanda bunlar %20 ile %80 şarj seviyelerinde kullanılırsa hedeflenen ömürlerini verebilirler. LFP’ler ise hem daha düşük şarj seviyelerine kadar kullanılabilir hem de %100 şarj seviyesine kadar şarj edilebilir. Bu durum onları avantajlı yapar ancak enerji yoğunluklarını düşük olması ve ağır olması tercih sebebini biraz kısıtlamaktadır. Bunun yanı sıra LFP’ler termal kaçak konusunda daha yeteneklidir ayrıca bu özelliği onu çok güvenli yapar. NMC ve NCA’lar kısa devre olursa sıcaklıkları çok yükselir ve yanmaya başlarlar. Bu yangını söndürmek neredeyse imkânsızdır. Çünkü yanarken kendi oksijenlerini kendileri üretirler. LFP’ler ise kolay kolay yanmazlar yansalar bile reaksiyon bu kadar hızlı olmaz. Burada katı hal bataryalarından da kısaca bahsetmek gerekirse onlar neredeyse yanmaz batarya olarak bilinmektedirler. Delinme ezilme aşırı ısınma gibi durumlarda bile yanmazlar.

Tablo 1. Batarya çeşitlerine göre özelliklerinin karşılaştırması

Batarya türü	Lityum iyon (NMC)	Lityum iyon (NCA)	Lityum demir fosfat LFP
Şarj seviyesi	%20 -%80 arası	%20 -%80 arası	%10 - %100
Gerilimler	3,60V, 3,70V nominal; tipik çalışma aralığı 3,0–4,2V	3,60V nominal; tipik çalışma aralığı 3,0–4,2V/hücre	3,20, 3,30V nominal; tipik çalışma aralığı 2,5–3,65V/hücre
Özgül enerji (kapasite)	150–220 Wh/kg	200–260 Wh/kg; 300 Wh/kg	90–120 Wh/kg
Şarj (C oranı)	0,7–1C, 4,20V’a kadar şarj eder, bazıları 4,30V’a kadar çıkar	0,7C akımla 4,20V’a kadar şarj olur	Tipik 1C akım, 3,65V’a kadar şarj eder
Deşarj (C oranı)	1C; bazı hücrelerde 2C mümkün; 2,50V kesme gerilimi	Tipik 1C; 3,00V kesme gerilimi; yüksek deşarj oranı pil ömrünü kısaltır.	Bazı hücrelerde 1C, 25C; 40A darbe 2,50V kesme
Döngü ömrü	1000–2000	500	2000
Termal kaçak	Tipik sıcaklık 210°C	Tipik sıcaklık 150°C	270°C
Maliyet	kWh başına yaklaşık 420 dolar	kWh başına yaklaşık 350 dolar	kWh başına yaklaşık 580 dolar

3. Lityum iyon bataryalar için kullanılan temel tanımlar

Lityum iyon bataryalar için bilinmesi gereken en temel kavramlar şarj vedeşarj katsayısı (C-rate ya da C oranı), Şarj durumu (SoC),deşarj derinliği (DoD) ve sağlık durumudur (SoH). Bu kavramlar bir bataryayı tanımlamak ve yeteneklerini anlamak açısından çok önemlidir.

3.1. C-rate

Bu kavram lityum iyon bataryanın tam kapasitesine ne kadar sürede şarj veya deşarj edildiğini gösteren bir orandır. C oranı bataryanın hızlı şarjı, üzerindeki stresi ve şarj deşarj esnasında ortaya çıkan ısı üretimini anlatmaya yarayan önemli bir parametredir. Ayrıca BMS'nin (batarya yönetim sistemi) güç ölçütlerini belirlemede de fayda sağlar (Elinta Charge, t.y.). 1C bataryanın tam kapasiteye doldurulmasının ya da tam dolu bataryanın boşaltılmasının 1 saat süreceği anlamına gelir. 2C yarım saat, 0,5C ise bu sürenin 2 saat olduğunu anlatır. Kısaca 120 kWh lik bir batarya 120 kW güç ile 1 saatte şarj veya deşarj edilir ve C oranı 1C'dir. Eğer 240 kW'lık bir güç ile bunu yaparsak C oranı 2C, 60 kW'lık bir güç ile ise C oranı 0,5C olur. Bunu formülle açıklayacak olursak;

$$C \text{ oranı} = \frac{\text{Şarj gücü (kW)}}{\text{Batarya enerjisi (kWh)}} \quad (1)$$

Veya:

$$C \text{ oranı} = \frac{\text{Şarj akımı (A)}}{\text{Batarya kapasitesi (Ah)}} \quad (2)$$

Denklem 2 aslında daha doğru bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ancak teorik olarak denklem 1'de yaklaşık sonuçlar verebilir.

Yüksek C oranı ile şarj bataryanın stresini ve ısısını artırır. Buda bataryanın daha çabuk yaşlanmasına veya zarar görmesine sebep olur. BMS'ler bu sınırları korumakla görevli oldukları halde hızlı şarjı belirlenen fabrika değerlerinde bataryaya verirler. Yani batarya hızlı şarjı desteklese de bu onun hızlı yaşlanmasına sebep olur.

Daha düşük C oranı (örneğin AC şarjı) ile şarj daha kibar, serin ve daha verimlidir. Daha yüksek C oranı (örneğin DC hızlı şarjı) ile batarya daha çabuk ısınır ve BMS gücü sınırlar. Böylece şarj arttıkça, pili korumak ve voltajı kontrol etmek gerekir ve C oranı azaltılır. Soğuk bataryalar, artan empedans ve risk nedeniyle yüksek C oranını kabul etmez, bu nedenle verimli şarj için batarya ısınana kadar güç sınırlandırılır (Sevim & Altın, 2023).

Bataryaların kapasiteleri sıcaklık ve yaşlanmaya bağlı olarak değişir. Bu da bataryanın güncel C oranını değiştirir. Aslında hesaplanan C oranı Ah ve akım kullanılarak hesaplanmalıdır. kWh ve kW yaklaşık bir hesaplamayı verir. Yazılım ve termal yönetim sistemleri ile C oranı değişik şekillerde yönetilebilir. Yani pilin termal yönetimi ve yapısı buna göre tasarlanmışsa yüksek C oranı sorun oluşturmaz. Ayrıca şarj stresi sadece C oranına değil, sıcaklık, SoC, yüksek SoC'de geçirilen süreye de bağlıdır.

3.2. Batarya şarj durumu (SoC)

Bu kavram bataryanın o andaki enerji miktarını belirler. SoC'ye göre elektrikli araçlarda kat edilecek mesafe, bataryanın doldurulması gereken zaman, aşırı deşarj ve anlık kullanım verimliliği gibi birçok konu tahmin edilmektedir. Elbette SoC tahmini oldukça zor ve karmaşık bir iştir. Bunun sebebi bataryada kimyasal enerji depolanmasına rağmen depolanan kimyasal enerji miktarına doğrudan erişim imkânsızdır. Bu nedenle bataryanın şarj durumunu doğrudan ölçmek oldukça zordur. Bunun için literatürde farklı metotlar kullanılmaktadır (Tezde & Okumuş, 2018).

Bir bataryanın laboratuvar şartlarında SoC durumu hakkında bilgi sahip olunmak isteniyorsa batarya doğrudan tam dolu halinden boşaltılır. Böylece içerisindeki enerji boşaltma anında doğru bir şekilde ölçülmüş olur. Ancak kullanım esnasında böyle bir yöntem tercih edilmez.

Bataryanın voltajı ölçülerek SoC hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu yöntem çok basittir ve voltaj düşmesi bataryanın doluluğu hakkında bilgi verebilir. Anlık yüklerde voltajın azalması ve yükün ortadan kalkması durumunda voltajın yükselmesi SoC doğruluğunu azaltabilir. Buna benzer bataryanın açık devre voltajı ve yük esnasındaki voltajı farklı olacağından tahmin karmaşık algoritmalar ile hesaplanmalıdır. Ayrıca bataryanın yaşlanması da voltaja bağlı ölçüm yönteminde değişikliklere sebep olur. Bu gibi durumlarda ya ölçüm algoritmaları yenilenmeli ya da batarya yenilenmelidir.

Bataryalardaki SoC durumu doğrusal olmayan bir sistemdir. Böyle bir sistemde tahminde bulunmak gerçekten zordur. Bunun için yapay sinir ağı kalman filtresi veya bulanık mantık gibi yöntemlerde kullanılır. Yapay sinir ağı doğrusal olmayan sistemlerde başarılıdır. Kalman filtresi ise Taylor formülü ile kullanılırsa SoC çözümlerinde başarılı olabilir. Bu yöntem genişletilmiş kalman filtresi denilmektedir (Xia et al., 2025).

Bataryaların şarj durumunu belirlemek için bir başka yöntem coulomb saymadır. Bu yöntemde bataryaya giren ve bataryadan çıkan elektrik akımları zamana bağlı olarak toplanır. Bu yöntem çok yaygın olarak kullanılır. Bunun için sistem denklem 3 ile bir hesaplama yapar.

$$SoC(t) = Soc(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (3)$$

Burada SoC(t), t anındaki şarj durumunu % cinsinden, SoC(t₀), başlangıçtaki yani t₀ anındaki şarj durumu % cinsinden, C_n, bataryanın üretim standartlarındaki maksimum kapasitesini Amper-saat cinsinden, I(τ), bataryaya giren veya çıkan anlık akımını amper cinsinden ve ∫ dt, akımın zamana göre integralini gösterir. Son ifade toplam transfer edilen elektrik yükünü Coulomb veya Amper-saat cinsinden alır. Bu yöntem oldukça kullanışlı ol-

makla beraber bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Burada bataryanın başlangıçtaki şarj durumu doğru bilinmelidir. Eğer burada bir yanlışlık olursa bütün hesaplamalar yanlış olur. Ayrıca araçta bulunan akım sensörü çok küçük de olsa bazı hatalar yapabilir. Bu durum zaman içerisinde büyük hesaplama yanlışlıklarına sebep olabilir. Burada iyi bir BMS (Batarya Yönetim sistemi) kullanılırsa voltaj ölçümü ile coulomb sayma birlikte kullanılır ve söylenen olumsuzluklar oldukça minimize edilir.

3.3. Batarya deşarj derinliği (DoD)

Deşarj derinliği (DoD) pilin ne kadar deşarj edildiğinin göstergesidir. Burada Soc ile DoD birbirinin tersi değerleri ifade eder. Yani pilin SoC değeri %70 ise Dod değeri ise %30 olmaktadır. Ayrıca bu değer pilin çalışma performansını göstermesi açısından önemli bir ölçüttür. Lityum tabanlı pillerde minimum DoD değeri önemli bir durumdur. Çünkü piller %80 DoD değerine kadar kullanılabilir. Bunun altına inilirse pillerin yaşlanması ve kapasite kaybı artmaktadır. Eşitlik 4 belirli bir zaman aralığındaki SoC değişimini ifade eder. DoD ile SoC arasındaki bağı Eşitlik 5 ile açıklayabiliriz (Yüksek & Alkaya, 2023).

$$\nabla SoC(k) = SoC(k) - SoC(k - 1) \quad (4)$$

$$DoD(n) = 1 - SoC(k) \quad (5)$$

Eşitlik 6 ile yaşlanma faktörünün DoD'a etkisi hesaplanabilir (Yüksek & Alkaya, 2023).

$$DoD_{ef} = \left(2 - \frac{DoD(n-2) + DoD(n)}{DoD(n-1)} \right) \quad (6)$$

DoD değeri %100 yaklaştıkça pilin hem kullanım ömrü azalmakta hem de depolayabileceği enerji miktarı düşmektedir. Yapılan bir çalışmada farklı DoD yüzdelerinde bataryanın ömür ve depolayabileceği enerji miktarı karşılaştırılmıştır. Tablo 2'de bu durum açık bir şekilde ifade edilmektedir (Yüksek & Alkaya, 2023).

Tablo2. Farklı DoD değerlerinin pilin enerji ve ömrü üzerindeki etkisi

DoD (%)	C oranı	Zaman (saat)	Çevrim	Enerji (kWh)
60	0.5	6561.22	3084	1729.6
70	0.5	6135.57	2476	1612.74
80	0.5	5802.53	2050	1519.81
90	0.5	5520.73	1734	1438.97
100	0.5	5305.64	1484	1372.18

Tablo incelendiğinde DoD oranı yükseldikçe bataryanın ömrü azaldığı gibi çevrim de azalır. Ayrıca daha az enerji depolayabilir.

3.4 Batarya sağlık durumu (SoH)

SoH zamanla bataryanın yaşlanma durumunu gösteren önemli bir parametredir. Yeni bir bataryada bu değer %100 kabul edilir. Batarya yaşlandıkça bu oran düşmeye başlar. Elektrikli araçlarda SoH %70 oranına düştüğü zaman bataryanın kullanım ömrü dolmuş olarak kabul edilir. Bu seviyeden itibaren batarya kullanılmaya devam edilebilir ancak bu aşamadan itibaren ikincil ömür denilen bir aşmaya geçilir.

BMS'ler bilindiği gibi bataryaların voltaj akım, sıcaklık gibi değerlerini şarj ve deşarj anında ölçebilirler. Bu parametreler bataryanın kullanım esnasındaki birçok özelliğin hesaplanmasında kullanılır. Ancak BMS'ler ölçülmesi zor olan SoH ile doğrudan bağlantılı bu görünmez yaşlanmayı maalesef belirleyemezler. Bunun için farklı algoritmalar kullanılır.

Bataryanın sağlık durumu eşitlik 7 ile belirlenebilir (Saqli, Bouchareb, Oudghiri, & M'Sirdi, 2019);

$$SoH(t) = \frac{1}{Q_{rated}} \int_{t_0}^t I(t) dt \quad (7)$$

Burada Q_{rated} kapasite oranını, I deşarj akımını, t ise zamanı ifade etmektedir. Ayrıca iç direnç artışına bağlı olarak da sağlık durumu belirlenebilir. Batarya kullanıldıkça kimyasındaki bozulmalar iç direnci artırır ve bundan dolayı mevcut kapasitesi düşmeye başlar. Bu durum SoH'yi doğrudan etkilemektedir. Eşitlik 8 ile SoH iç dirence bağlı olarak belirlenebilir.

$$SoH_R = \frac{R_{EOL} - R_{şimdi}}{R_{EOL} - R_{yeni}} \times 100 \quad (8)$$

Burada $R_{şimdi}$ şu anki batarya iç direnci (Ω), R_{yeni} bataryanın ilk günkü direnci (Ω) ve R_{EOL} bataryanın kullanım ömrünü tamamladığında ölçülen iç direncidir (Ω).

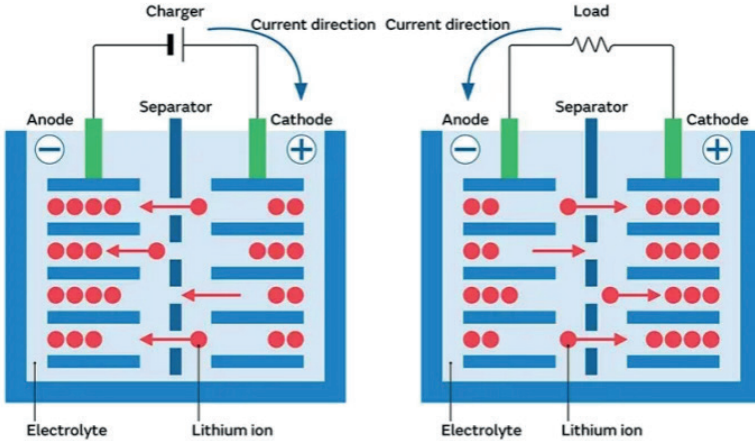
Kalman filtresi, yapay zeka, ve artımlı kapasite analizi gibi yöntemler BMS'lerin içerisine entegre edilerek SoH çok yüksek doğrulukta tespit edilebilir. Burada önemli olan husus sistemin hassaslık oranı ve buna bağlı hangi yöntemin tercih edileceğidir.

Bataryalardaki yaşlanma kapasitif veya kinetik yaşlanma olmak üzere iki türlü şekilde açıklanabilir. Kapasitif yaşlanmada batarya şarj ve deşarj olma işlemleri esnasında anot ve katot içerisindeki aktif kimyasalların yapısı bozulur. Böylece lityum iyonlarının konumlanacağı yuvalar azalır ve kapasite düşer. Kinetik yaşlanma da ise bataryanın sıvı elektrotu anot ile reaksiyona girerek katı elektrolit arayüzü denilen (SEI) istenmeyen bir katman oluşturur. Bu katman serbest lityum iyonlarını tutar. İyon miktarı azalınca iç direnç yükselir ve kapasite düşer.

Batarya kullanıldıkça bu durumlar kaçınılmaz olur. Ancak batarya uygun şartlarda kullanılırsa bu süreç uzar ve batarya daha verimli ve uzun ömürlü olur. Elektrikli araçlarda SoH %70 olduğunda elektrikli araç için batarya paketi ömrünü tamamlamış kabul edilir. Çünkü hızlanma ve yokuş çıkmak gibi bataryadan güç istenildiği durumlarda iç direncin artmasından dolayı gerekli akımı sağlayamaz ve menzil ciddi oranda düşer. Bu tip bataryalar elektrikli araçlarda kullanılsa da evsel veya sanayi gibi çeşitli sabit depolama uygulamalarında değerlendirilir.

4. lityum iyon tabanlı bataryaların çalışma mantığı

Bu bataryaların içerisinde anot, katot, elektrolit ve separatör bulunmaktadır. Temelde lityum iyonların anot ve katot arasında hareketi ile elektrik depolar ve istenildiğinde elektriği artı ve eksi uçlara bağlanan devre elemanlarına verir. Lityum iyonlar separatörden serbestçe geçmelerine rağmen elektronlar geçemez ve devreyi anot ve katot arasında tamamlar.



Şekil 3. Lityum iyon bataryanın çalışması (Battery Swap Station, t.y.)

Anot (negatif elektrot) batarya şarj edildiğinde lityum iyonlarının bulunduğu bölümdür. Genellikle grafiten imal edilmiştir. Oldukça ucuz ve istikrarlı bir malzeme olması onu en çok kullanılan anot malzemesi yapmaktadır. Ancak son zamanlarda elektrikli araçların menziline ve bataryanın şarj verimliliğini artırmak için silisyum tabanlı (silikon) kullanılmaya başlanmıştır. Silisyum grafitte göre yaklaşık 10 kat daha fazla enerji depolayabilir. Bu aynı zamanda hızlı şarjı destekleme konusunda da bataryaya yetenek kazandırır. Ancak silisyum şarj esnasında hacmini yaklaşık %300 büyültür. Buda bataryanın aşırı şişmesine ve SEI tabakasının zarar görmesine dış muhafazanın çatlamasına sebep olur. Bunun önüne geçmek için sektörde silisyum %5-%10 oranında grafitte katılarak Silisyum karbon anotlar üretilmektedir. Tesla Model 3 ve Model X’de bu anotlar kullanılmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılmamasına rağmen lityum titanat (LTO) anotlarda pillerde anot malzemesi olarak bulunabilir. Bu yapıdaki piller çok güvenlidir, nerdeyse ölümsüzdür ve yaklaşık 15 dakikada şarj edilebilirler. Ancak maalesef enerji yoğunluğu grafitte göre çok düşüktür. Bir diğer anot malzemesi lityum metal anotlardır. Çok yüksek bir enerji yoğunluğu sunmalarına karşın şarj esnasında sıvı elektrot ile kullanıldığında anot yüzeyinde dentrit olarak bilinen sivri uçlu yapılar meydana getirir. Bu yapılar zamanla separatörü deler ve pilin kısa devre yapmasına sıcaklığının artmasına ve termal kaçaklar oluşmasına sebep olur. Bu oldukça tehlikeli bir durumdur. Bu tür bataryalar gelecekte katı hal olarak da bilinen katı elektrolit ile kullanıldığında dentrit oluşumunun engelleyeceği düşünülmektedir.

Pillerin gerçek karakteristiğini ve adını belirleyen bölüm pozitif elektrot olan katottur. Burası lityum iyonların kaynağıdır. Pilden elektrik enerjisi çekildiğinde lityum iyonları anottan katoda hareket ederler. Katodun yapısı pilin maksimum voltajını belirleyici ana unsurdur. Yani katot lityum demir fosfat (LFP) ise maksimum voltaj 3,65V iken nikel mangan kobalt (NMC) katotda maksimum voltaj 4,2V'dur.

Elektrolit anot ve katot arasında lityum iyonlarının serbestçe hareket edebileceği bir çözüldür. Organik çözücüler ile içerisinde lityum çözündürülmüştür. Yapısı sıvı ya da jel kıvamındadır. Yapısında elektronlar hareket edemez sadece lityum iyonlarının hareketine izin verir. Sıcaklık yükselirse ya da pil uygun olmayan yüksek voltajlarda şarj edilirse elektrolitin yapısı bozulmaya başlar. Bu durum pilin iç direncini yükseltir ve bataryanın sağlığı bozulur.

Separatör anot ile katot arasında mikroskobik gözeneklere sahip ince polietilen veya polipropilen maddelerden yapılmış bir zardır. Anot ile katodun temasını engeller. Böylece pil kısa devre olmaz. Yapısındaki nano gözenekler sadece lityum iyonlarının geçişine izin verir. Bataryanın sıcaklığı beklenmedik bir şekilde 130°C gibi bir değeri aşarsa separatör eriyerek gözenekleri kapatır ve lityum iyon geçişi kalıcı olarak durur. Böylece akım kesilir ve pil kendisini termal kaçağa karşı korumaya alır. Tabiki bu durum pilleri yanmaya karşı tamamen korumaz. Separatörün erime hızı sıcaklığın yükselme hızından düşükse pilin sıcaklığı saniyeler içerisinde 200°C'tın üzerine çıkar ve katot malzemesi bozulmaya başlar ve oksijen salınımı yapar. Oksijen ile yüksek ısı yanma reaksiyonunu başlatır. Aracın kaza yapması esnasında pilin darbe alması veya yüksek hızlı şarj esnasında oluşan dentritler separatörü deler ve anot ile katot birbirine temas eder. Burada oluşan kısa devre yangın başlatır. Üretim esnasında oluşabilecek hatalarda pillerin separatörlerine zarar verebilir. Separatörlerde oluşabilecek zayıf noktalar şarj ne kadar kusursuz olursa olsun zamanla yırtılır ve anot ile katot arasında temas ve sonuç olarak pilde yanma oluşabilir.

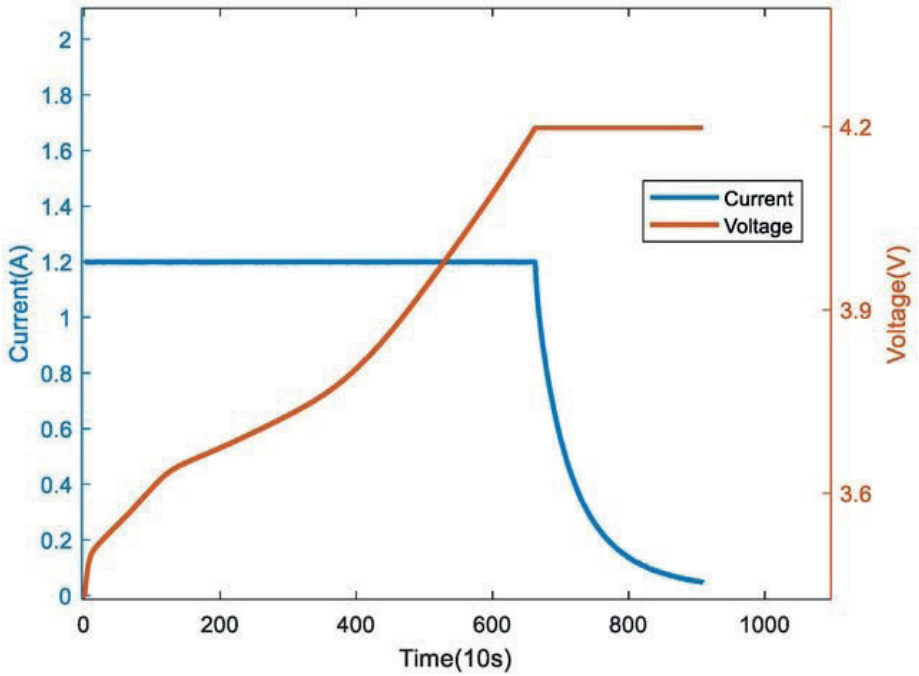
Separatörlerin termal kaçağa karşı kendini kapatması aslında bir pasif güvenlik sistemidir. Ancak yavaş sıcaklık artışlarında etkili olabilir. Bunun yerine bataryanın maksimum çalışma sıcaklığı olan 50°C sıcaklığın üzerine çıkmasını engelleyen ve yanma reaksiyonunu başlatmayan önceden tahin etme metodunu kullanan aktif güvenlik sistemlerinin bulunması daha önemlidir. Bu hem bataryanın yanması gibi üzücü durumları ortadan kaldırır hem de bataryanın uzun ömürlü olmasını sağlar.

5. Lityum iyon bataryaların şarj yöntemleri

Lityum tabanlı bataryalar uygun şartlarda tutulursa uzun süre kullanılabilir ve çok iyi akım verebilirler. Bunun için üretimden kaynaklanan hatalar hariç şarj etme yöntemleri, kullanım şartları ve saklama koşulları çok önemlidir. Şarj etme yöntemleri batarya kullanımında en kritik aşamadır. Literatürde geleneksel ve gelişmiş şarj yöntemleri olmak üzere iki farklı şekilde bataryalar şarj edilmektedir.

5.1. Geleneksel şarj yöntemleri

Bu yöntem günümüzde kullanımda olan bütün lityum iyon bataryalarda güvenli ve etkili bir şarj işlemi gerçekleştirir. Kontrolünün kolay olması onu popüler yapmaktadır. Bu yöntemde temelde sabit akım (Constant Current - CC) ve sabit voltaj (Constant Voltage - CV) olmak üzere iki farklı türde şarj birleştirilmiştir. BMS önce CC modunda maksimum güvenli akım oranı (C-rate) ile şarja başlar. Akım sabit tutularak bataryanın uçlarındaki voltaj (V_{cell}) izlenir. Böylece yüksek hızda şarj işlemi devam eder. Batarya boş olduğu için bu hızlı şarj güvenlidir, bir sıkışma ve olumsuz sıcaklık artışı gözlenmez. Batarya voltajı maksimum değere ulaştığında (NMC ve NCA için 4.2V ve LFP için 3.6V) BMS bunu algılar voltajı sabit tutup şarj akımını kademeli olarak düşürür. BMS, batarya dolmaya başladığı için içeri girmekte zorlanan akımı kademeli olarak düşürür. Mümkün olan en düşük C-oranında şarjı sonlandırır. Şekil 4’de bu yönteme ait şarj eğrileri verilmiştir (Luo et al., 2024).



Şekil 4. Geleneksel CC ve CV yöntemi ile şarj eğrileri

Aslında batarya %80 doluluk oranına geldiğinde maksimum şarj voltajına ulaşmış olur. İşte bu ana kadar ki şarj işlemi yüksek akım sayesinde CC türünde yapıldığı için kısa sürer. Bundan sonraki şarj türü akımın üstsel olarak sürekli yarısına düşürüldüğü CV türüdür. Burada bataryada dolum sonuna yaklaştığı için akım içeri girmekte zorlanır. Hala CC türünde şarja devam edilseydi yüksek akım bataryayı zorlayarak ısınmasına ve yanması gibi olası hatalara sürükleyecektir. Bundan dolayı BMS uzun sürecek olan CV türüne geçiş yaparak hem bataryanın voltajını hem de içeri giren akımı kontrol ederek güvenli şarjı tamamlar.

Bu iki türde şarjın süreleri kıyaslandığında CC türünde batarya %80'e gelinceye kadar geçirdiği süre miktarınca kalan %20'lik kısmı CV türünde doldurmak için zaman harcar.

Bir örnek verecek olursak, $C_n = 100Ah$ nominal batarya kapasitesine sahip bir elektrikli araç $V_{max} = 4.2V$ lityum iyon batarya ile donatılmıştır. Batarya CC-CV şarj stratejisiyle şarj edilecektir. CC evresinde $C-rate=1.5 C$ oranı ile şarja başlanılacaktır. Batarya %80 doluluğa ulaştığında CV evresine geçilecek ve sabit voltajda akım zamana bağlı olarak Eşitlik 9'a göre azaltılarak akım başlangıçtaki akımın %10'una ($0.1 I_{cc}$) düşene kadar devam edecektir.

$$I(t) = I_{cc} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Burada zaman sabiti $\tau=0.5$ saat olarak verilmiştir. Bu senaryoda CC evresinde uygulanan sabit akımı (I_{cc}), CC evresinde batarya %0'dan %80'e ulaşıncaya kadar geçen süre (t_{cc}), CV evresi sonunda akım 0.1. I_{cc} değerine düşmesine kadar geçen süreyi bulacağız. Öncelikle Eşitlik 10 ile başlangıç şarj akımını bulalım.

$$I_{cc} = C - rate \times C_n \quad (10)$$

$$I_{cc} = 1.5 \times 100 \text{ Ah} = 150 \text{ A}$$

Bu evrede batarya %0'dan %80'e şarj olacağı için kapasitenin 80 Ah'lık bölümü şarj olur;

$$Q_{\text{şarj}} = 0.80 \times 100 \text{ Ah} = 80 \text{ Ah}$$

Sabit akım evresi için geçen süre ise 0.5333 h olacaktır.

$$t_{cc} = \frac{Q_{\text{şarj}}}{I_{cc}} = \frac{80}{150} = 0.5333 \text{ h}$$

Dakikaya çevrildiğinde süre 32 dakika olur.

$$t_{cc} = 0.5333 \times 60 = 32 \text{ dakika}$$

CV evresinde geçen süre (t_{cv}) hesaplanırken Eşitlik 9 kullanılır.

$$0.1 \cdot I_{cc} = I_{cc} \cdot e^{-\frac{t_{cv}}{\tau}}$$

İki taraftaki I_{cc} birbirini götürür:

$$0.1 = e^{-\frac{t_{cv}}{\tau}}$$

Her iki tarafın doğal logaritması alınır:

$$\ln(0.1) = -\frac{t_{cv}}{0.5}$$

$$-2.3026 = -\frac{t_{cv}}{0.5}$$

$$t_{cv} = 2.3026 \times 0.5 = 1.1513 \text{ h}$$

dakikaya çevrildiğinde:

$$t_{cv} = 1.1513 \times 60 = 69.08 \text{ dakika}$$

Olur. Toplam şarj süresi:

$$t_t = t_{cc} + t_{cv} = 32 + 69.08 = 101.08 \text{ dakika}$$

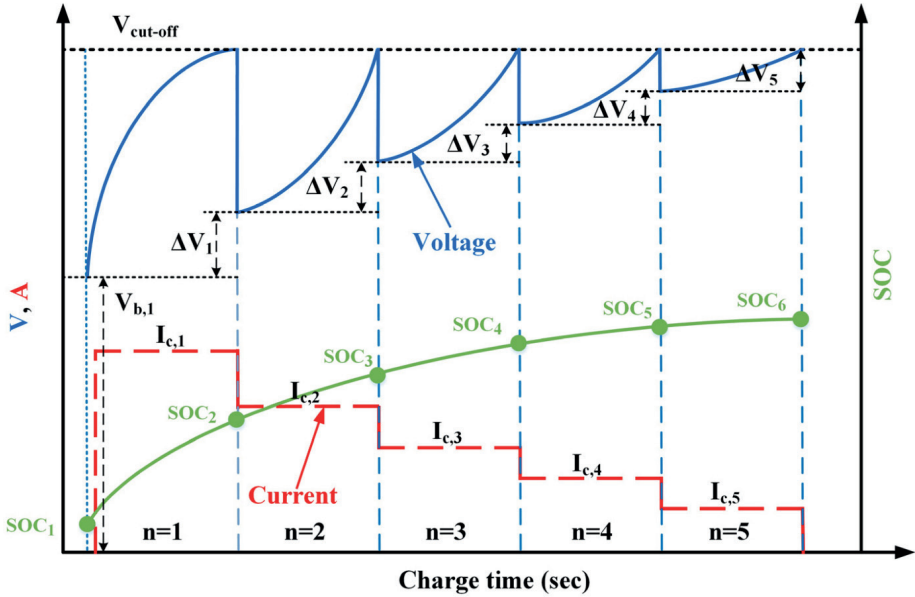
Olur. Burada zaman sabiti (τ) azaltılırsa akım daha çabuk azaltılır ve CV evresindeki şarj işlemi kısalmır. Ancak bunu bataryanın SoH'sinin yüksek kalması açısından istemeyiz. Aynı zamanda batarya kapasitesi ne olursa ol-

sun C-rate değişmediği sürece bataryanın dolum süresi teorikte hep aynı olur. Ancak büyük kapasiteli ve küçük kapasiteli bataryalar şarj cihazının verdiği akıma göre şarj olduklarından BMS büyük kapasiteli bataryanın ısısının artmasına bağlı olarak şarj akımını kısımlar. Bu durum büyük kapasiteli bataryanın daha uzun sürede dolması ile sonuçlanır.

5.2. Gelişmiş şarj yöntemleri

Geleneksel şarj yöntemleri çok kullanılan ve şarj işlemin kolaylaştıran yöntem olmakla beraber uzun şarj süreleri ve batarya yaşlanması gibi olumsuzlukları da hızlandırır. Bunun yerine günümüzde gelişmiş olarak tanımlanan farklı ve etkili şarj yöntemleri de mevcuttur.

Çok kademeli sabit akımlı şarj (MCC) aslında geleneksel CC evresinde yapılan şarja benzerdir. Şarj işlemi batarya boşken ilk olarak en yüksek C-rate ile başlatılır. Batarya belirli bir doluluk seviyesine ulaştığında (%30 gibi) sabit akım kademeli olarak düşürülür. Bu yöntem ile batarya en boş durumda bol akım ile şarj edilir. Doluluk arttıkça akım azaltılır. Böylece batarya termal ve kimyasal stresten uzak tutulur. Şekil 5’de MCC ile şarj esnasında akım ve voltajın zamana bağlı değişimi gösterilmektedir (Han, 2024).

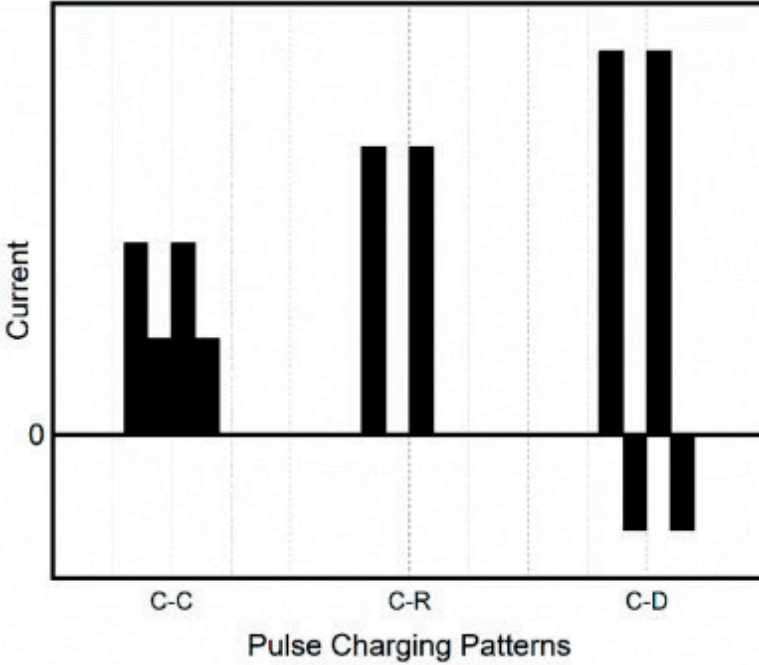


Şekil 5. MCC yöntemi ile şarj esnasında batarya voltaj ve akım değişimi

Bir başka yöntem Darbeli (pulse) şarjdır. Geleneksel yöntemlerde batarya sürekli akım ile beslendiğinde elektrot yüzeylerinde lityum iyonlar aşırı yığılma yapar. Buda kimyasal tıkanıklığa sebep olur. Bu yöntem ile bataryaya sürekli akım verilmez. Bunun yerine belirli frekans aralığında akım uygulanır. Sistem önce kısa süreli yüksek akım darbeleri sonra kısa bir dinlenme sonra mikro saniyeler içerisinde deşarj darbesi uygulanır. Bu işlem artarda

tekrarlanır. Böylece dinlenme periyodunda biriken lityum iyonlar rahatça hareket ederler. Deşarj darbesinde ise anot yüzeyinde oluşan dentritleri parçalar. Bu yöntem ile SoH optimum düzeyde korunmuş olur. Şekil 6’da darbeli şarjın aşamaları gösterilmektedir (Liu & Wang, 2024).

Burada C şarj, R dinlenme, D ise deşarj periyodunu göstermektedir. İşlem bir yüksek akım bir düşük akım şarjı ile başlar sonra yüksek akım dinlenme periyodu ile devam eder son olarak yüksek akım ve deşarj darbeleri ile sonlanır.



Şekil 6. Darbeli şarjın aşamaları

Şarj işlemleri konusunda geline son nokta öngörülü kontrol olan MPC yöntemidir. Burada BMS içerisine gömülen yazılım sabit belirli bir strateji yerine bataryanın anlık olarak gerçek zamanlı elektrokimyasal ve termal yönetimini matematiksel bir algoritmayla tanımlar. Böylece bataryanın gelecek 10-20 saniye içerisinde termal veya voltaj durumu hakkında tahminde bulunur. Böylece şarj devam ederken bataryanın karşılaşılabileceği olumsuzluklar tahmin edilerek en uygun şarj akımı en uygun zamanda verilir ve bataryanın ısınması ve voltaj stresine girmesi engellenir. Burada Algoritma şarj kısa sürsün sıcaklık 45°C’yi geçmesin anot lityum kaplama sıkıntısı yaşamasın gibi hedefler doğrultusunda çalışır.

Gelecekte yapay zeka ile birleştirilen gelişmiş şarj yöntemleri aracın her bir hücresi için ayrı karar mekanizması ile en sağlıklı şarjı yapacaktır. Aynı zamanda aracın kullanım stratejileri ile şarj stratejileri birleştirilerek bataryanın

yaların ömürleri uzatılacaktır. Böylece kişiselleştirilmiş şarj yöntemleri hayatımızda daha sıklıkla görülecektir.

KAYNAKLAR

- Volkswagen Türkiye. (2026). *Elektrikli araçlarda akü*. Erişim adresi: <https://binekarac.vw.com.tr/tr/volkswagen-dunyasi-teknolojisi/volkswagen-surus-rehberi/Bilgilendirme/elektrikli-araclarda-aku.html>
- OGGUSTO. (2025, 2 Ocak). *Türkiye'deki elektrikli araç hızlı şarj istasyonları*. Erişim adresi: <https://www.oggusto.com/gentlemen/otomobil/turkiyedeki-elektrikli-arac-hizli-sarj-istasyonlari>
- Trugo. (t.y.). *Resmî web sitesi*. Erişim adresi: <https://www.trugo.com.tr/>
- Battery University. (2026). *BU-205: Types of lithium-ion*. Erişim adresi: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion/>
- Elinta Charge. (2026). *C-rate*. Erişim adresi: <https://elintacharge.com/glossary/c-rate/>
- Yüksek, G., & Alkaya, A. (2023). Effect of the depth of discharge and C-rate on battery degradation and cycle life. *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ELECO60389.2023.10415967>
- Battery Swap Station. (2026, 2 Ocak). *Lityum ve lityum iyon pillerin kapsamlı bir karşılaştırması*. Erişim adresi: <https://batteryswapstation.com/tr/lithium-vs-lithium-ion-batteries/>
- Sevim, G., & Altın, N. (2023). *Lityum bataryalarda şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) kestirimi*. KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 5(1), 33–51. <https://doi.org/10.55213/kmujens.1250621>
- Tezde, E. İ., & Okumuş, H. İ. (2018). Batarya Modelleri ve Şarj Durumu (SoC) Belirleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25. <https://izlik.org/JA37PS43KR>
- Xia, T., Xia, X., Yue, J., Gong, Y., Tan, J., & Wen, L. (2025). *Research on estimation optimization of state of charge of lithium-ion batteries based on Kalman filter algorithm*. *Electronics*, 14(7), 1462. <https://doi.org/10.3390/electronics14071462>
- Yüksek, G., & Alkaya, A. (2023). *Effect of the depth of discharge and C-rate on battery degradation and cycle life*. In *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (ss. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELECO60389.2023.10415967>
- Luo, L., Zhang, C., Tian, Y., & Liu, H. (2024). *State-of-health estimate for the lithium-ion battery based on constant voltage current entropy and charging duration*. *Batteries*, 10(5), 164. <https://doi.org/10.3390/batteries10050164>
- Han, S. (2024). *Optimal charging current protocol with multi-stage constant current using dandelion optimizer for time-domain modeled lithium-ion batteries*. *Batteries*, 10(9), 320. <https://doi.org/10.3390/batteries10090320>
- Liu, J., & Wang, X. (2024). Experimental study of the effect of different pulse charging patterns on lithium-ion battery charging. *Journal of Power Sources*, 610, 234700. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234700>

Saqli, K., Bouchareb, H., Oudghiri, M., & M'Sirdi, N. K. (2019). *An overview of State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) estimation methods of Li-ion batteries*. In International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA).



ÇOKLU MİNİ KANALLI ISI DAĞITICILARIN ISI AKTARIM PERFORMANSI VE AKIŞ DÜZENLERİNİN İRDELENMESİ

“ ”

Koray KARABULUT¹

Yeliz ALNAK²

¹ Prof. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5680-0988

² Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, ytas@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4383-3806.

1. GİRİŞ

Elektronik teknolojilerindeki hızlı ilerlemeyle birlikte modern elektronik cihazlar, taşınabilirlik ve artan işlem gücü talebine yanıt olarak giderek daha fazla minyatürleşme ve daha fazla entegrasyon yönünde ilerlemektedir (Feng ve ark., 2020). Bu eğilim, araştırmacıları ve tasarımcıları, artan performans ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla daha fazla minyatürleştirilmiş elektronik bileşen ürünlerini entegre etmeye yöneltmiştir. Ancak, bu gelişme cihaz boyutlarının küçülürken güçlerinin artmasının, birim alan başına ısı akısında önemli bir artışa yol açması nedeniyle termal yönetimde artan bir zorluğu da beraberinde getirmiştir. Bu ısının etkili ve hızlı bir şekilde dağıtılmaması durumunda, çalışma sıcaklıkları kritik sınırları aşacak ve bu da performansı ve güvenilirliği olumsuz yönde etkileyebilecektir (Mozafari ve ark., 2021). Hidrotermal ısı emicilerin termal performansını artırmak için çeşitli pasif ve aktif yaklaşımlar kullanılarak birçok hesaplamalı ve deneysel araştırmalar yapılmıştır. Bu çözümlerden bazıları giriş ve çıkış tasarımlarını (Al-Hasani ve Freegah, 2022; Chein ve Chen, 2009), çeşitli konfigürasyonlara sahip genişletilmiş yüzeylerin (kanatçıkların) kullanımını (John ve ark., 2010; Babar ve Ali, 2019; Hosseinirad ve ark., 2019; Vasilev ve ark. 2021), kanal biçimlerini (Gunnasegaran ve ark., 2010) ve soğutucu katkı maddelerinin kullanımını (Sohel ve ark., 2014; Xia ve ark., 2016; Rabby ve ark., 2021) içermektedir. Birçok bilim insanı, bir optimizasyon stratejisi olarak değişen dalga boyları ve genliklere sahip dalgalı bir kanalın (Khoshvaght-Aliabadi ve ark., 2016; Khoshvaght-Aliabadi ve ark., 2022; Lin ve ark., 2017; Khoshvaght-Aliabadi ve ark., 2021) yanı sıra bir yakınsama-ıraksama kanalının (Gong ve ark., 2011; Xu ve ark., 2016) kullanımını araştırmıştır. Toprak ve ark. (2022), tüp benzeri ağ tasarımına sahip bir mini kanal ısı emici (MCHS) üzerinde deneysel ve sayısal bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, kare tasarımın termal verimlilik katsayısı açısından genel olarak en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Shen ve ark., (2025), Tesla desenli mikrokanal, pim kanatlı mikrokanal ve dikdörtgen mikrokanal ısı emicilerinin ısı transferi ve akış özelliklerini farklı çalışma koşulları altında karşılaştırmak ve analiz etmek amacıyla deneyler gerçekleştirilmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre diğer iki mikrokanal ısı emiciye kıyasla, Tesla desenli mikrokanal ısı emicinin ekstra 150 W/cm^2 ısı akısını dağıtabildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, gömülü çoklu Tesla desenli mikrokanalın gelişmiş ısı transferinin, çalışma sıvısının duvar yüzeyine birden fazla kez çarpmasına neden olan kavisli yapısına bağlamışlar ve bunun da sınır tabakasını bozarak, çalışma sıvısının geri akışını

engellediğini bulmuşlardır. Yang ve ark., (2026), çalışmalarında çok yüksek yüksek ısı akılarında verimli arka plan ve sıcak nokta soğutması için silisyum karbür (SiC) çok kanallı mikrokanaallı bir ısı emicinin performansını deneysel olarak araştırmışlardır. 15 μm genişliğinde ve 100 μm derinliğinde bir mikrokanaal dizisi, plazma aşındırma yöntemi kullanılarak yüksek termal iletkenliğe sahip bir SiC alt tabakada üretilmiştir. Soğutucu olarak tek fazlı deiyonize su kullanılmış ve mikrokanaal ısı emicinin performansı değişen arka plan ve yerel sıcak nokta ısı akısı koşulları altında değerlendirilmiştir. SiC çoklu mikrokanaal ısı emici, $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 'lik bir alanda 3190 W/cm^2 'lik bir arka plan ısı akısını yalnızca 32 kPa'lık bir basınç düşüşüyle başarıyla emebilmiş ve $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 'lik bir alanda $12,0 \text{ kW/cm}^2$ 'lik yerel bir sıcak nokta ısı akısını ortadan kaldırırken, sıcak noktanın sıcaklık artışını 150 °C'nin altında tutabilmeyi başarabilmiştir. Ge ve ark., (2022), modern mikro boyutlu bir ısı emici ile donatılmış sıvı soğutmalı bir CPU'nun termal-hidrolik performansını değerlendirmişlerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonlarını bir algoritmayla birleştirerek, farklı boyutlarda kanatçıklara sahip bir ısı emiciyi optimize etmeyi önermişlerdir. Sonuçlar, bu optimizasyonun ısı transfer kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ancak aynı zamanda gerekli pompalama gücünde de artışa yol açtığını göstermiştir.

Kanal konfigürasyonunun, çok kanallı bir ısı emicisinde akışkan akışı ve ısı iletimi üzerindeki etkisi Ghadhbhan ve Jaffal (2023) tarafından incelenmiştir. Ulaştıkları bulguları, kanal tasarımıdaki son değişikliğin geleneksel düz kanala kıyasla ısı transfer verimliliğini artırdığını göstermiştir. Dalgalı kanal için ise Nu sayısındaki en büyük artışın %30,5 olduğu tahmin edilmektedir. Wang ve ark., (2019), farklı kanal konfigürasyonlarını (yamuk, üçgen ve dikdörtgen) ve ayrıca giriş ve çıkış kombinasyonlarını (I, C ve Z tipleri) simüle etmek için sonlu hacim yönteminden yararlanmışlardır. Dikdörtgen giriş ve çıkışa sahip dikdörtgen başlıklı modeli, sürekli ve tutarlı bir hız sağlaması ve ısıyı da diğerlerine göre daha iyi iletmesi nedeniyle en pratik model olarak seçmişlerdir. Modellerin her birinde ortada dikey bir giriş ve bir, iki veya dört çıkış noktası bulunmaktadır. Sonuçlar, dört çıkışlı model konfigürasyonunun en yüksek kaliteye ve en düşük akış direncine sahip olduğunu göstermiştir. Siahchehrehghadikolaei ve ark. (2025), karbon nanotüpler/ H_2O nanoakışkan uygulaması ve dalgalı kanatlı çukurlar kullanarak CPU'nun (bilgisayar işlemcisi) termal yönetimini iyileştirmek için hibrit pasif soğutmanın sayısal bir simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Termal etkiyi ve soğutma gücünü iyileştirmek için, delikli nozullara sahip bir

palet bıçağı ve farklı konsantrasyonlarda titanyum oksit nanoparçacıkları, bir CFD programı kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır (Gholinia ve ark., (2022)). Nabi ve ark. (2023), termal-fotovoltaik modüllerin performansını artırmak için yeni, çevre dostu kırmızı şarap-rGO/H₂O nanoakışkanı ve parafin mumu kullanmışlardır. Termal ve hidrolik performansın özelliklerini yenilikçi bir köpekbalığı ölçeğinde yüzgeç geometrisi tasarımı kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir (Ghouchi ve ark., (2024)).

Isı dağıtıcıların termal performansı üzerine yapılan kapsamlı çalışmalara rağmen, akış bölünmesinin akışkan akış davranışı ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisi çok az dikkate alınmıştır. Mevcut araştırmaların çoğu, termal performansı iyileştirmek için kanal şeklini, kütle akış hızını ve uygulanan ısı akışını ayarlamaya odaklanmaktadır. Ancak, bu iyileştirmeler çoğunlukla büyük bir basınç düşüşüne yol açmakta ve bu da hidrolik verimlilik üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu çalışmada ise, MKID (mikro kanal ısı dağıtıcı-emici) içindeki kanal şeklini tanıyarak sıvı dağıtım yüzey alanını ve ısı yayılımının homojenliğini artırmak ve böylece kabul edilebilir bir basınç düşüşünü korurken; genel termal verimliliği yükseltmek amaçlanmaktadır. Bu kısıtlamayı gidermek için de bu çalışmada iki yeni MKID konfigürasyonu sunulmakta ve akış bölünmesinin hidrotermal performans üzerindeki etkisinin kapsamlı bir analizi gerçekleştirilmektedir. Modeller geleneksel çok kanallı mini soğutucular olup, karşılaştırılan temel model olan Model 1, girişten çıkışa doğru akış yönünde ilerleyen boylamasına bölüntülerden oluşurken, Model 2, akış yolunu iki ardışık segmente ayırıp, her segmentte geleneksel modele göre daha kısa bir etkili yol uzunluğuyla sonuçlanır; Model 3'de ise yine akış yolu iki ayrı parçaya bölünmüştür ve girişte akış dağıtılmakla birlikte, her parçanın kendi kanal ağı vardır ve bu kanallar doğrudan girişten beslenir ve çıkışa doğru yönlendirir. Ayrıca, akışkan olarak su haricinde ısı iletkenliklerinin daha iyi olduğu %2 hacimsel konsantrasyonlu Al₂O₃-su nanoakışkanı kullanılmıştır.

2. SAYISAL MODELLEME

Isı emicinin hem termal hem de hidrolik kapasite açısından etkinliğini belirlemek için, CFD sayısal simülasyonunda üç farklı model oluşturulmuştur. SIMPLE yöntemi, hız ve basıncı birleştirmek için yönetim denklemlerinde kullanılırken, momentum ve enerji denklemleri ikinci dereceden sayısal bir yöntem kullanılarak uygulandı. Kanaldaki taşınım ısı transferinin çözümünde

Ansys-Fluent programından yararlanılmıştır. Ayrıklaştırma yöntemi olarak momentum denklemleri için “Second Order Upwind” yöntemi tercih edilmiştir. Sayısal çözümlerin yakınsaması için yakınsama kriteri momentum denklemi için 10^{-6} ve enerji denklemi için 10^{-7} olarak alınmıştır.

MKID (mikro kanal ısı dağıtıcı) modeli, birbirinden izole edilmiş iki ayrı hesaplama alanına sahiptir. Bu çalışmada kullanılan katı bakırın termofiziksel özellikleri ise şunlardır: 385 J/(kgK) özgül ısı, 401 W/(mK) ısıl iletkenlik ve 8933 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Çok miktarda sıvı içeren bölge, soğutma işlemi sırasında ısıyı taşınım yoluyla aktarmaktan sorumludur. Katı bölge, akış yönüne göre değişen şekilde çok sayıda kanatçıktan, katı duvarlardan ve ısınan bir tabandan oluşmaktadır. Çok miktarda sıvı içeren bölge ise MKID kanalı içinde sıvıların hareketi için kullanılır. Sınır koşullarının doğruluğu, simülasyon yöntemini önemli ölçüde etkileyebilir. Tekrarlanabilir ve geçerli sonuçlar elde etmek için, sınırlar, kabul görmüş fiziksel prensiplere uygun olarak tanımlanmalı ve uygulanmalıdır. Akış ve ısı transferi alanlarının sınırları genellikle akışkanın derinliği veya sıcaklığı tarafından belirlenir. Şekil 2, hesaplama alanının ve sınır koşullarının şematik taslaklarını göstermektedir.

Kritik sınır koşullarından biri, tabana uygulanan ve 20.000 W/m² olarak belirlenen ısı akısıdır. Soğutma sıvısı esas olarak alanın içine girerken 300 K (27°C) sıcaklığa sahip saf sudan ve Al₂O₃-su nanoakışkanından oluşmaktadır. Laminer akış koşulu, kullanılmıştır. Kütle boyunca tipik akış hızı 0,0025 kg/s ile 0,0045 kg/s arasında 0,0005 kg/s'lik adımlarla değişmektedir. Kanallın çıkışında, sıfır basınç koşulu ($P_{out} = P_{atm}$) uygulanmaktadır. Bakır ısı emici plakanın üst ve yan kısımları, yalıtılmış olup yalnızca alt kısmından ısı uygulanmaktadır. Akışkan, üst kısımdan kanala giriş yaparken alt taraftan ısı çıkış yapmaktadır. Şekil 1’de sırasıyla Model 1, Model 2 ve Model 3’ün geometrik yapıları ve bu yapılar üzerinde de kanal ve bölüntü kanatçıklarının ölçüleri verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan her bir ısı emicinin temel boyutları; 5 mm yükseklik, 86 mm genişlik ve 100 mm uzunluktur. Her bir kanallın genişliği 4 mm, yüksekliği 2 mm’dir ve kanallar arasındaki kanatçık kalınlığı 2 mm’dir. Akışkan kanallardan akarken, giriş sıcaklığı 300 °C olup, bakır tabakadan açığa çıkan ısı akışkan sıcaklığının artmasına neden olur.

Buna göre analiz aşağıdaki varsayımsal gerçeklere dayanmaktadır:

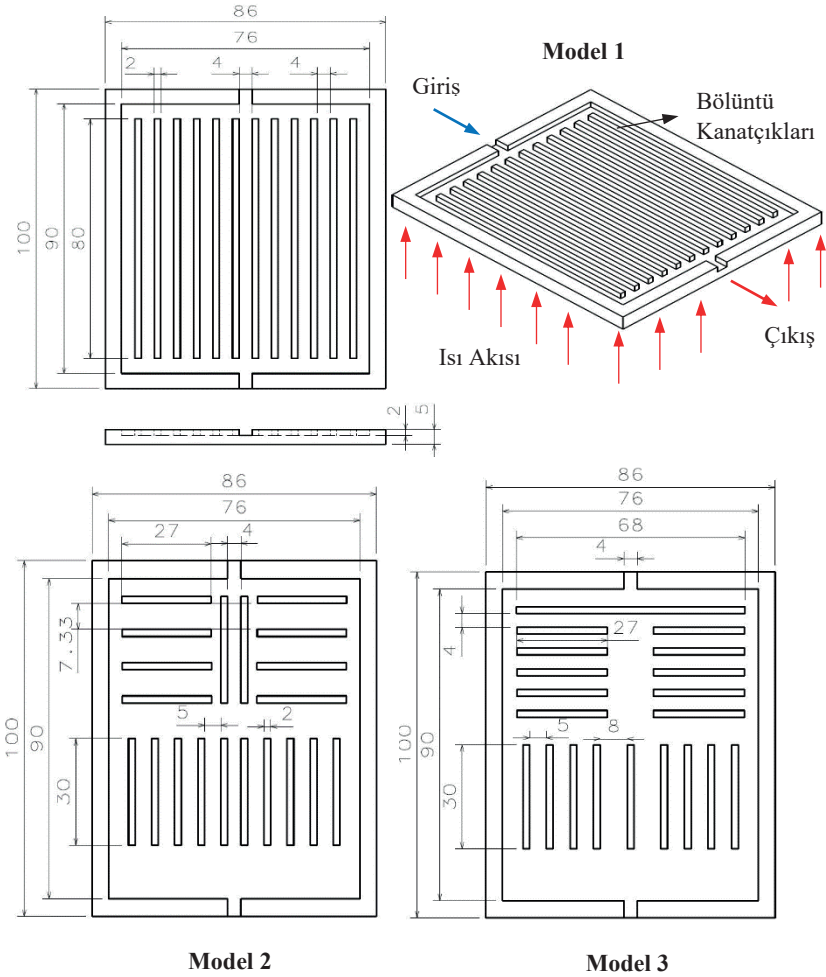
Sıvının hareketi kararlı ve doğrusaldır.

Akış, tek fazlı ve üç boyutludur.

Kanalda zorlanmış taşınım ile ısı transferi söz konusudur.

Isı emicilerin tabanı sabit bir ısı akışına maruz kalırken, diğer tarafları tamamen yalıtılmıştır.

Radyasyonla ısı transferi mekanizması, analizde önemsiz bir rol oynadığı düşünüldüğü için dikkate alınmamıştır.



Şekil 1. Modellerin geometrik yapı ve ölçüleri

Analiz için aşağıdaki korunum denklemleri, önceki varsayımların önerdiği gibi, (Hosseinirad ve ark., (2019); Khoshvaght-Aliabadi ve ark., (2022); Lin ve ark., (2017); Ammar ve ark., (2025))'te verilen formüller kullanılarak geliştirilmiştir. Kütle korunumunu açıklayan süreklilik denklemi, aşağıdaki formülle verilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Akışkan içindeki doğrusal momentumun korunumu için hareket eşitliği şu şekilde yazılır:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Burada ρ , p ve μ sırasıyla soğutma sıvısının yoğunluğunu, basıncını ve dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

Isı enerjisinin korunumu prensibini açıklayan enerji eşitliği şöyledir:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

ρ_f ve $c_{p,f}$ değişkenleri sırasıyla soğutma sıvısının yoğunluğunu ve özgül ısı kapasitesini gösterirken, yerel sıcaklık T 'dir.

Katı haldeki ısı iletimi yoluyla tüketilen enerjinin eşitliği şöyledir:

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (6)$$

Burada k_s , ısı emici malzemenin özgül termal iletkenliğini temsil eder.

MKID aracılığıyla soğutucu tarafından emilen ısı enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Chamanroy, Z., Khoshvaght-Aliabadi, (2019)):

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T_s = h A_{etkin} (T_{b,ort} - T_{f,ort}) \quad (7)$$

Birim alan başına aktarılan ısı miktarı şu eşitlikle hesaplanır ((Chamanroy, Z., Khoshvaght Aliabadi, (2019); Imran ve ark., (2018)):

$$h = \frac{\dot{m}c_p\Delta T_s}{A_{etkin}(T_{b,ort}-T_{f,ort})} \quad (8)$$

Burada $\dot{m}$, c_p ve ΔT_s sırasıyla soğutucunun ortalama kütle akış hızını, özgül ısısını ve soğutucunun sıcaklık farkını temsil etmektedir. A_{etkin} , $T_{b,ort}$ ve $T_{f,ort}$ ise sırasıyla sıvının temasta olduğu yüzey alanını, akışkanın ortalama sıcaklığını ve akışkanın film sıcaklığını ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$T_{f,ort} = \frac{T_{f,giriş} + T_{f,çıkış}}{2} \quad (9)$$

$$Nu_{ort} = \frac{hD_h}{k_f} \quad (10)$$

Burada h , D_h ve k_f sırasıyla ortalama ısı transfer katsayısını, kanalın hidrolik çapını ve soğutucunun termal iletkenliğini ifade etmektedir.

Hidrolik çap aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (11)$$

A , kanalın kesit alanını temsil eder ve P , kanalın ıslak çevresinin uzunluğudur.

Kanal boyunca basınç düşüşü aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır

$$\Delta p = \frac{f\rho D_h}{2} V^2 \quad (12)$$

Bu eşitlikte, Δp kanalın giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşüşü, f sürtünme faktörü ve V ise akışkanın kanaldaki ortalama hızını temsil etmektedir.

Reynolds sayısını hesaplamak için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_h \mu} \quad (13)$$

Çalışmada kullanılan nanoakışkanın termofiziksel özellikleri literatürde de sıklıkla kullanılan ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş aşağıdaki

eşitlikler yardımıyla hesaplanmakta ve bu eşitliklere göre bulunan değerler Tablo 1’de sunulmaktadır.

Nanoakışkanın yoğunluğu (Mohammed ve ark., (2011))

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{nf} + \varphi\rho_{np} \quad (14)$$

Nanoakışkanın ısı kapasitesi (Mohammed ve ark., (2011))

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_w + \varphi(\rho c_p)_{np} \quad (15)$$

Nanoakışkanın ısıl iletkenliği (Mohammed ve ark., (2011))

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_w + 2(k_{np} - k_w)\varphi}{k_{np} + 2k_w - 2(k_{np} - k_w)\varphi} k_w \quad (16)$$

Nanoakışkanın viskozitesi (Mohammed ve ark., (2011))

$$\mu_{nf} = \mu_w(1 + 2.5\varphi) \quad (17)$$

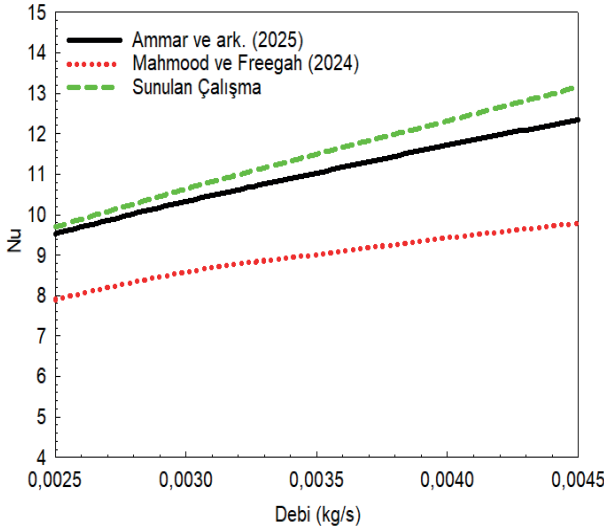
Bu eşitliklerde, φ ve ρ_{np} sırasıyla nanoakışkanın konsantrasyonunu ve katı halde nanoparçacığın yoğunluğunu belirtirken, c_p özgül ısıyı göstermektedir. nf ve np ise sırasıyla nanoakışkan ve katı nanoparçacığı temsil etmektedir.

Tablo 1. Su ve nanoakışkanın termofiziksel özellikleri (300 K)

Akışkan	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	μ (Ns/m ²)
Su	0,613	998,2	4182	0,001003
Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanı	0,65037	1188,236	3484,44	0,0010531

3. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Sayısal sonuçları doğrulamak ve bunların mevcut literatürle tutarlılığını göstermek amacıyla geleneksel model olan Model 1 için bu çalışmanın bulguları, önceki araştırmaların sayısal (Ammar ve ark. (2025) ve deneysel (Mahmood ve Freegah (2024)) ortalama Nu sayısı bulgularıyla Şekil 2’de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Her ne kadar bu çalışma ile literatür arasında Nu sayısı değerlerinde farklılıklar olsa da bu tutarsızlıklar, esas olarak sayısal çalışmadaki ağ sayısı sıklığının farklılığından ve sayısal çalışmada çalışmayı basitleştirmek amacıyla yapılan kabullerin deneysel çalışmada tam olarak karşılanamamasından kaynaklı farklılıklardan oluşmaktadır. Buna rağmen, çalışmanın sonuçları kabul edilebilir sınırlar dahilinde olup birbirlerine oldukça yakındır ve bu nedenle çalışmanın doğru ve kabul edilebilir olduğu söylenebilir.



Şekil 2. Sonuçların literatürdeki sayısal ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılması

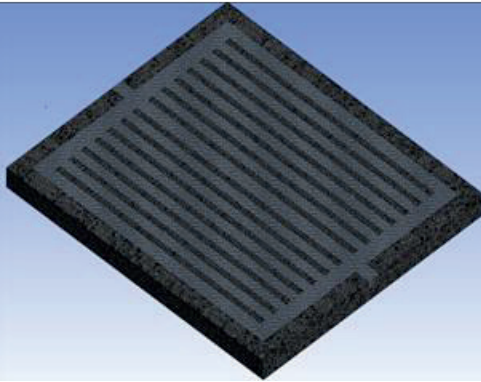
3.1. Sonuçların Ağ Sayısından Bağımsızlığının Karşılaştırılması

Bu araştırmada yer alan tüm modellerde, sıvı ve katı alanlar dahil olmak üzere, tetrahedral (düzgün dörtyüzlü) ağ yapısı kullanılmıştır. Sayısal doğruluk üzerinde ağ elemanı sayısının önemli etkisi göz önüne alındığında,

çözümde yakınsama sağlanana kadar eleman boyutu kademeli olarak azaltılarak ağ optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve bu noktadan sonra ek optimizasyon sonuçlarda anlamlı bir değişikliğe yol açmamıştır. Hesaplama verimliliğini artırmak için sonuç doğruluğunu korurken, simülasyon süresini azaltmak amacıyla uygun olduğunda kasıtlı olarak ince ağlar kullanılmıştır. Geleneksel model için (Model 1) su akışkanı kullanılarak yapılan analizlerde Tablo 2’de görüldüğü gibi ağ sayısının 1773148 adetten daha fazla artırılmasının hem Nu sayısı hem de basınç düşüşü değerlerinde belirgin bir artışa neden olmadığı ve bu sebeple 1773148 adet ağ sayısının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, çalışmada düzgün dörtyüzlü ağ yapısının şekli Model 1 için Şekil 3’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kütleli akış debisi ve ağ sayısına göre Nu sayısı ve basınç düşüşü değerleri

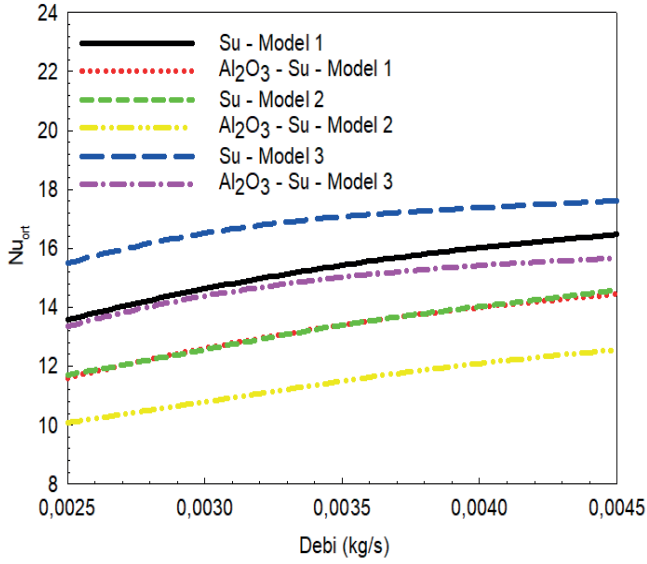
Ağ Sayısı	$\dot{m}$ (kg/s)=0.0025		$\dot{m}$ (kg/s)=0.0035		$\dot{m}$ (kg/s)=0.0045	
	Nu	Basınç Düşüşü (Pa)	Nu	Basınç Düşüşü (Pa)	Nu	Basınç Düşüşü (Pa)
509570	8,54	151,42	9,84	265,47	12,45	394,41
1295790	8,75	153,44	10,24	268,79	13,47	414,25
1773148	9,70	154,41	11,50	275,43	14,15	424,11
2049112	9,70	154,42	11,50	275,42	14,14	424,12



Şekil 3. Sonuçların literatürdeki sayısal ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Şekil 4, farklı kanal oluşumlarının farklı kütleli akış hızlarında ve su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanının kullanımının mikro kanal ısı dağıtıcılarının (MKID) ortalama Nu sayısı (Nu_{ort}) üzerindeki etkisini göstermektedir. Daha yüksek soğutma sıvısı akış hızlarının tüm modeller için ortalama Nu sayısında artışa yol açtığı Şekil 4'den görülebilmektedir. Kütle akış hızının artması, akışkan hızını yükseltmekte ve böylece kanaldaki akışın türbülans şiddeti iyileşirken ısı transfer yüzeyine yakın termal sınır tabakasının kalınlığı azalmaktadır. Bu durum da duvara yakın sıcaklık gradyanını iyileştirmekte ve yüksek ısı transferi elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, kanalda akış bölünmesinin artırılarak akışkanın ısınmış yüzey ile daha iyi bir şekilde temas etmesinin sağlanması, katı levha yüzeyi ile taşınım ısı transferini artırarak enerji alışverişini iyileştirmektedir. Yani, iç akış kanallarının sayısının artırılması ve girişi ve çıkışı dikkatli bir şekilde konumlandırılmasına dikkat edilmelidir. Şekil 4 incelendiğinde, Model 3'de Model 1 ve Model 2'ye göre daha yüksek ortalama Nu sayısı değerleri elde edilirken, nanoakışkanın viskozite değerinin az da olsa suya göre daha yüksek olması, bölünmüş MKID'nin kanal aralarında akışkanın hız dağılımını etkilemesiyle Model 3 için su akışkanının aynı kanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanına göre daha yüksek Nu sayısı değerlerine ulaşılmasına sebep olmaktadır. Aynı durum, Model 1 ve 2 için de geçerlidir. 0,0045 kg/s'lik akış hızında Model 3 için su akışkanının Al_2O_3 -su nanoakışkanına göre Nu sayısı %12,43 daha fazladır. Bununla birlikte, 0,0035 kg/s'lik nanoakışkan debisinde Model 3'ün Nu sayısının Model 2'den %30,72 daha yüksek olduğu bulunmuştur. Buna göre, kanaldaki akış bölünmesinin ısı transferini artırıcı etkisinin göz önüne alınması kanal tasarımı aşamasında en önemli noktalardan biri olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Ortalama Nu sayısının farklı MKID kanalları ve akışkanlar için debiye göre değişimleri

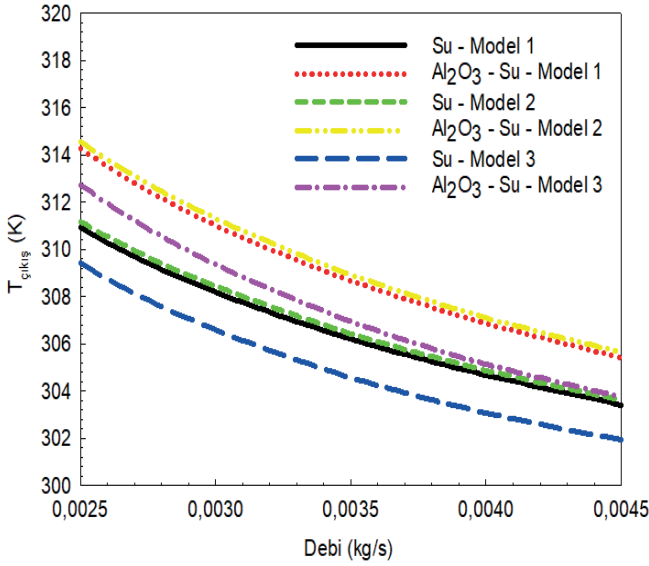
Farklı akış hızlarına sahip mikro kanal ısı dağıtıcılarındaki (MKID) akışkanların kanaldan çıkış sıcaklık değerleri ($T_{\text{çıkış}}$) Şekil 5’de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. MKID’daki bölünmüş kanallarda ısı transferindeki akışkanların daha fazla akış yolundan geçerek kanal içerisinde kalması, akışkana olan ısı transferini artırarak kanaldan çıkış sıcaklığının daha fazla olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, nanoakışkanların su akışkanına göre daha yüksek ısıl iletkenli değerleri, ısının katı yüzeyden akışkana daha fazla transfer olmasını ve MKID’ların daha güvenilir sıcaklık sınırları içerisinde kalmasını sağlayarak enerji transferini artırmaktadır. Kütleli debinin artışıyla kanal içerisinde artan akışkan hızı, kondüksiyonla olan ısıl direncin artmasına sebep olurken, konveksiyonla olan ısıl direncin ise azalmasını sağlamaktadır. Bu durum ise kondüksiyonla olacak ısı transfer hızını azalttığından akışkanın kanal çıkışındaki sıcaklığında azalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle, nanoakışkan kullanılan kanallarda en yüksek akışkan çıkış sıcaklık ($T_{\text{çıkış}}$) değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, birbirlerine çok yakın olmakla birlikte Model 2 Model 1’den daha iyi bir performans sergilemektedir.

Kütlesel debi akış hızlarına göre MKID kanalları boyunca farklı akışkan tipleri için basınç düşüşleri Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Kütle akış hızı arttıkça yüksek hızın kanal duvarları boyunca daha fazla sürtünme kaybına ve ayrıca akışkan katmanları ve kanal yüzeyi arasında viskoz sürtünme ve kayma kuvvetlerine neden olmasından dolayı basınç düşüşü artmaktadır. Bu durum da akışın devam etmesi için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır. Ayrıca, daha yüksek hızlar akış türbülansına neden olarak enerji kayıplarının ve basınç düşüşünün artmasına katkıda bulunmaktadır. Şekil 6 incelendiğinde, kanal içerisinde akış bölünme yapılarına bağlı olarak en yüksek basınç düşüşü değerlerinin Model 3 için her iki akışkan tipi için de elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, Model 2 ve Model 1 için farklı kütlesel akış hızlarında basınç düşüşü değerleri birbirlerine yakınsak olarak su için nanoakışkandan daha yüksek değerlere ulaşılmaktadır. Basınç düşüşünün fazla olması kanal içerisinde akışkan hareketini etkileyerek ısı transferinin farklı akış bölünme tasarımlarında farklılıklar göstermesine sebep olmaktadır. 0,0045 kg/s akış hızı değerinde Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılan kanallarda Model 3 için basınç düşüşü değeri, Model 2'den %37,57 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

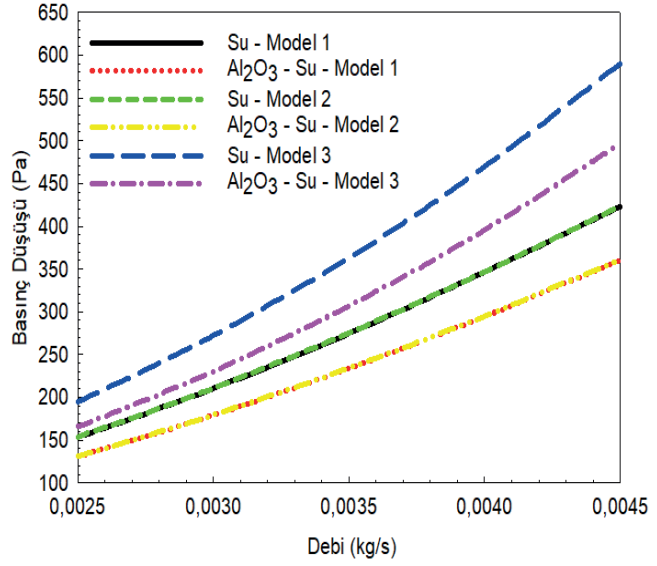
Şekil 7 ve 8'de sırasıyla 0,002 kg/s ve 0,004 kg/s akış hızlarında MKID modelleri olan A-Model 1, B-Model 2 ve C-Model 3 için Al_2O_3 -su nanoakışkanın (a) akım çizgisi konturu ve (b) hız konturu dağılımları verilmektedir. Geleneksel model olan Model 1 için her iki kütlesel akış hızında da akışkan, bölümlere ayrılarak kanal çıkışına doğru yönelmekle birlikte daha dirençsiz akış yolu olan doğrudan karşı taraftaki çıkışa doğru hareketini sürdürmektedir. Bu durum, hız konturu dağılımından da kolaylıkla görülebilmektedir. Kanalin giriş kısmının Model 1'e göre daha bölmeli olduğu Model 2'de ise akış bölmeler arasından dağılarak kanalın alt kısmındaki kanal kısmına gelerek kanal çıkışına doğru yönlense de akışın bölünme durumu Model 1'e göre daha iyidir. Model 3'de ise akışın kanal girişindeki kısmı kapalı olduğundan akışın bölmeler arasındaki dağılımı hem Model 1 hem de Model 2'ye göre daha da iyileştirilmiştir. Bu geliştirilmiş yönlenme kütlesel akış hızının 0,004 kg/s olduğu Şekil 8'den daha iyi görülebilmektedir. Akışkanın kanallardaki bölmeler arasındaki hareketinin iyileştirilmesi yüksek ısı

kapasitesine sahip MKID'larının soğutularak ısınmış bölgelerin azaltılması için son derece önemlidir.

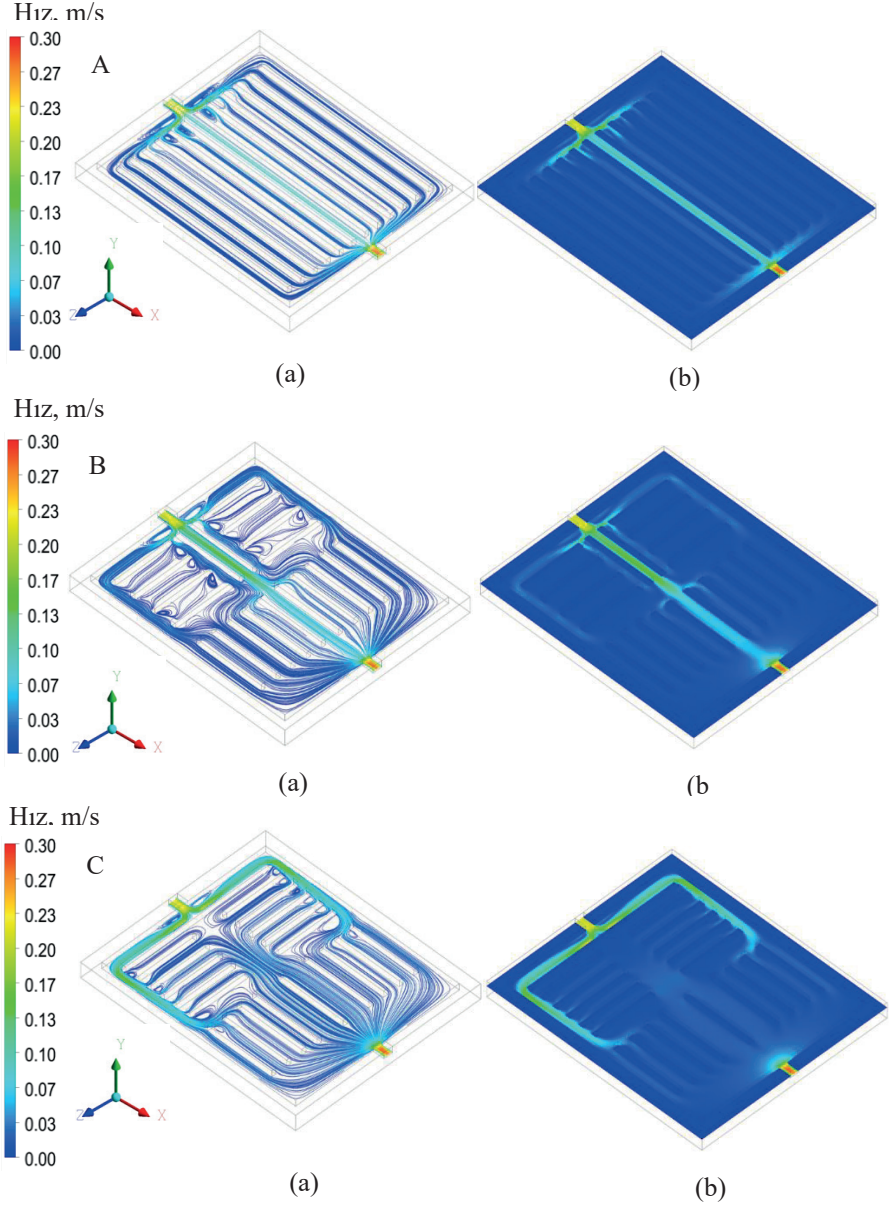
Sırasıyla 0,002 kg/s ve 0,004 kg/s akış hızlarında MKID'larında A-Model 1, B-Model 2 ve C-Model 3 için nanoakışkan sıcaklık konturu dağılımları Şekil 9 ve 10'da gösterilmektedir. Tüm MKID modelleri için kanallardaki akış hızlarının artmasıyla ısı transferinin artışına bağlı olarak akış hızının 0,004 kg/s olduğu modeller için daha düşük sıcaklık değerleri elde edildiği kontur dağılımlarından görülebilmektedir. 300 K sıcaklıklı akışkanın kanala girişi yaptığı durumda alt bakır plaka ile sıcaklık farkı en fazla olduğundan ısı transferi bu bölgede en yüksek, ancak kanal çıkışına doğru akışkan ısınarak ilerlediğinden sıcaklık farkı azalmakta ve MKID modellerinde (Model 1 ve 2) sıcaklık artışları görülmektedir. Model 3 için ise akışın kanallar arası bölgede daha iyi olan dolaşımı nedeniyle kanal genelindeki sıcaklığın daha düşük olduğu farklı akış hızlarının olduğu her iki durum için de görülebilmektedir.



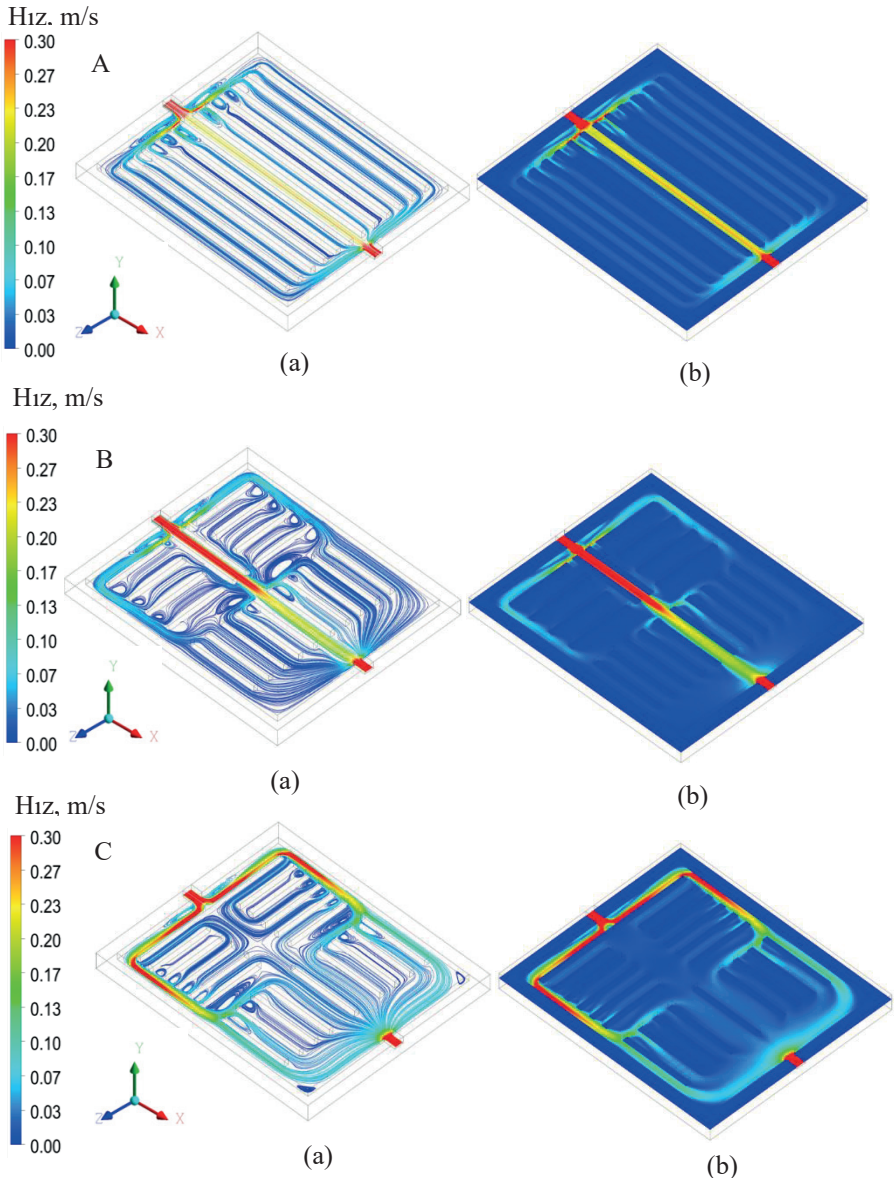
Şekil 5. Kanaldan çıkış sıcaklığının ($T_{\text{çıkış}}$) farklı MKID kanalları ve akışkanlar için debiye göre değişimleri



Şekil 6. Kanal boyunca basınç düşüşünün farklı MKID kanalları ve akışkanlar için debiye göre değişimleri



Şekil 7. 0,002 kg/s kütleli akış hızında nanoakışkan hız konturu dağılımı
A- Model 1 B- Model 2 C- Model 3
(a) akım çizgisi (b) hız konturu



Şekil. 8 0,004 kg/s kütleli akış hızında nanoakışkan hız konturu dağılımı

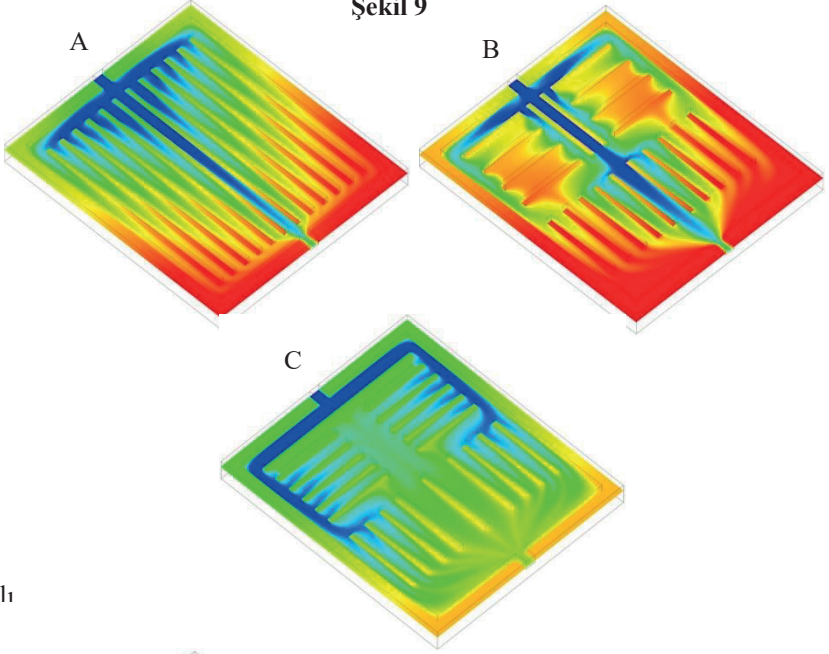
A- Model 1 B- Model 2 C- Model 3

(a) akım çizgisi (b) hız konturu

Sıcaklık, K



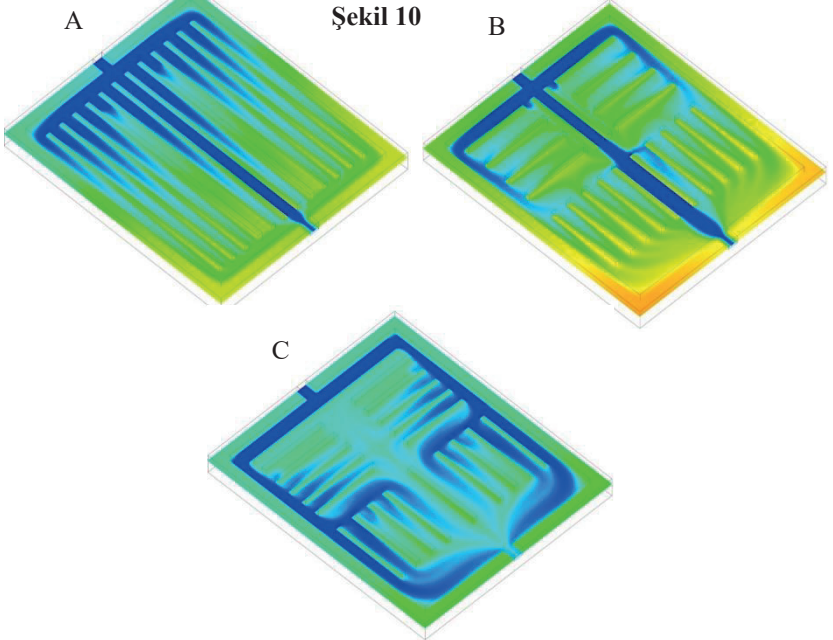
Şekil 9



Sıcaklık



Şekil 10



Şekil 9 ve 10. 0,002 kg/s ve 0,004 kg/s kütleli akış hızında nanoakışkan sıcaklık konturu dağılımı
A- Model 1 B- Model 2 C- Model 3

5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, ısı transferini optimize ederken basınç düşüşü dezavantajını en aza indirmeyi amaçlayarak, farklı kanal konfigürasyonlarının MKID'ların termal ve hidrolik performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sayısal MKID modeli, sonuçları yayınlanmış sayısal ve deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu çalışmanın temel bulguları şunlardır:

- Kanalda akış bölünmesinin artırılarak akışkanın ısınmış yüzey ile daha iyi bir şekilde temas etmesinin sağlanması, katı levha yüzeyi ile taşınım ısı transferini artırarak enerji alışverişini iyileştirmektedir.

- Model 3'de Model 1 ve Model 2'ye göre daha yüksek Nu_{ort} değerleri elde edilirken, Model 3 için su akışkanı kullanıldığında aynı kanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanına göre daha yüksek Nu sayısı değerlerine ulaşılmaktadır. Aynı durum, Model 1 ve 2 için de geçerlidir.

- 0,0045 kg/s'lik akış hızında Model 3 için su akışkanının Al_2O_3 -su nanoakışkanına göre Nu_{ort} değeri, %12,43 daha fazladır. Bununla birlikte, 0,0035 kg/s'lik nanoakışkan debisinde Model 3'ün Nu sayısının Model 2'den %30,72 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

- Nanoakışkan kullanılan kanallarda en yüksek akışkan çıkış sıcaklık ($T_{çıkış}$) değerlerine ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, birbirlerine çok yakın olmakla birlikte Model 2 Model 1'den daha iyi bir ısı performans sergilemektedir.

- Kanal içerisinde akış bölünme yapılarına bağlı olarak en yüksek basınç düşüşü değerleri, Model 3 için her iki akışkan tipi için de elde edilmektedir. Bununla birlikte, Model 2 ve Model 1 için farklı kütleli akış hızlarında basınç düşüşü değerleri birbirlerine yakınsak olarak su için nanoakışkandan daha yüksek değerlere ulaşılmaktadır.

- 0,0045 kg/s akış hızı değerinde Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılan kanallarda Model 3 için basınç düşüşü değeri, Model 2'den %37,57 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- Hız konturu dağılımı incelendiğinde, Model 3’de akışın kanal girişindeki kısmı kapalı olduğundan akışın bölmeler arasındaki dağılımı hem Model 1 hem de Model 2’ye göre daha da iyileştirilmiştir.

- Tüm MKID modelleri için kanallardaki akış hızlarının artmasıyla ısı transferinin artışına bağlı olarak akış hızının 0,004 kg/s olduğu modeller için daha düşük sıcaklık değerleri elde edildiği kontur dağılımlarından görülebilmektedir.

- Model 1 ve Model 2’de kanal çıkışına doğru sıcaklık artışları görülmekte ve Model 3 için ise akışın kanallar arası bölgede daha iyi olan dolaşımı nedeniyle kanal genelindeki sıcaklığın daha düşük olduğu farklı akış hızlarındaki her iki durum için de görülebilmektedir.

Buna göre, kanaldaki akış bölünmesinin ısı transferini artırıcı etkisinin göz önüne alınması kanal tasarımı aşamasında en önemli noktalardan biri olduğu görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Al-Hasani, H.M., Freegah, B. (2022) Influence of fluid inlet-outlet on hydrothermal evaluation for different serpentine mini-channel heat sink configurations, *Heat Transfer* 51(8), 7635-7654.
- Ammar, N.A., Freegah, B., Al-Obaidi, A.R. (2025) Hydrothermal performance enhancement of minichannel heat sink with inline and staggered arrangements of straight and wavy fins, *Heat Transfer*, 54, 3775-3789.
- Babar H., Ali, H.M. (2019) Airfoil shaped pin-fin heat sink: potential evaluation of ferric oxide and titania nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 202, 112194.
- Chamanroy, Z., Khoshvaght-Aliabadi, M. (2019) Analysis of straight and wavy miniature heat sinks equipped with straight and wavy pin-fins, *International Journal of Thermal Sciences* 146, 106071.
- Chein, R., Chen, J. (2009) Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance, *International Journal of Thermal Sciences* 48(8), 1627-1638.
- Feng, Z., Ai, X., Wu, P., Lin, Q., Huang, Z. (2020) Experimental investigation of laminar flow and heat transfer characteristics in square minichannels with twisted tapes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 158, 119947.
- Ge, Y., He, Q., Lin, Y., Yuan, W., Chen, J., Huang, S.M. (2022) Multi-objective optimization of a mini-channel heat sink with non-uniform fins using genetic algorithm in coupling with CFD models, *Applied Thermal Engineering*, 207, 118127.
- Ghadhban, F.N., Jaffal, H.M. (2023) Numerical investigation on heat transfer and fluid flow in a multi-minichannel heat sink: effect of channel configurations, *Results in Engineering*, 17, 100839.
- Gholinia, M., Ranjbar, A.A., Hosseinpour, A.A. (2022) CFD analysis of (TiO₂)-H₂O nanofluids on Si-IGBT power electronic module with a new micro-nozzle model, *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 147(20), 11577-11589.

- Ghouchi, T., Pourfallah, M., Gholinia, M. (2024) The thermal and hydrodynamic analysis in a heat sink with different configurations of shark scales-based fins, *Applied Thermal Engineering*, 250, 123492.
- Gong, L., Kota, K., Tao, W., Joshi, Y. (2011) Parametric numerical study of flow and heat transfer in microchannels with wavy walls, *Journal of Heat Transfer*, 133(5), 051702.
- Gunnasegaran, P., Mohammed, H.A., Shuaib, N.H. Saidur, R. (2010) The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(8), 1078-1086.
- Hosseinirad, E., Khoshvaght-Aliabadi, M., Hormozi, F. (2019) Effects of splitter shape on thermal-hydraulic characteristics of plate-pin-fin heat sink (PPFHS), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118586.
- Imran, A.A., Mahmoud, N.S., Jaffal, H.M. (2018) Numerical and experimental investigation of heat transfer in liquid cooling serpentine minichannel heat sink with different new configuration models, *Thermal Science and Engineering Progress*, 6,128-139.
- John, T.J., Mathew, B., Hegab, H. (2010) Parametric study on the combined thermal and hydraulic performance of single phase micro pin-fin heat sinks part 1: square and circle geometries, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(11), 2177-2190.
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Sahamiyan, M., Hesampour, M., Sartipzadeh, O. (2016) Experimental study on cooling performance of sinusoidal-wavy minichannel heat sink, *Applied Thermal Engineering*, 92, 50-61.
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Feizabadi, A., Nouri, M. (2021) Design of novel geometries for minichannels to reduce junction temperature of heat sinks and enhance temperature uniformity, *Applied Thermal Engineering*, 192, 116926.
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Abbaszadeh, A., Rashidi, M.M. (2022) Comparison of co- and counter-current modes of operation for wavy minichannel heat sinks (WMHSs), *International Journal of Thermal Sciences*, 171, 107189.

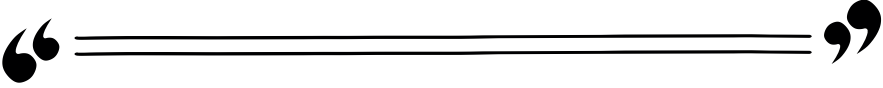
- Lin, L., Zhao, J., Lu, G., Wang, X.D., Yan, W.M. (2017) Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude, *International Journal of Thermal Sciences*, 118, 423-434.
- Mahmood, H., Freegah, B., Faik, A.M.E.D., Saleh, Q. (2024) Optimizing minichannel heat sink design: a combined numerical and experimental analysis of inlet/outlet configurations and pin fin enhancements, *Heat Transfer*, 54(3), 1921-1939.
- Mohammed, H.A., Gunnasegaran, P., Shuaib, N.H. (2011) The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 767-773.
- Mozafari, M., Lee, A., Mohammadpour, J. (2021) Thermal management of single and multiple PCMs based heat sinks for electronics cooling, *Thermal Science and Engineering Progress* 23, 100919.
- Nabi, H., Gholinia, H., Khiadani, H., Shafieian, A. (2023) performance enhancement of photovoltaic-thermal modules using a new environmentally friendly paraffin wax and red wine-rGO/H₂O nanofluid, *Energies*, 16(11), 4332.
- Pak, B.C., Cho, Y.I. (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 11, 151-170.
- Rabby, M.I.I., Masuri, S.U., Kaniappan, L., Loulou, T., Islam, A.S. (2021) Effect of water based nanofluids on laminar convective heat transfer in developing region of rectangular channel, *CFD Letters*, 11(12), 74-87.
- Shen, Y-T., Dai, Y-B., Lu, J-X., Zhou, R., Chen, H., Cheng, W-L. (2025) Experiment on enhanced heat transfer of embedded manifold Tesla-patterned microchannel heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 165, 109050.
- Siahchrehghadikolaie, S., Ghadikolaie, S.S., Gholinia, M., Ahmadi, G. (2025) application of CNTS/H₂O nanofluid and the wavy fin with dimples in thermal management of CPU: a numerical modeling of

hybrid passive cooling, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 86(18), 6545-6562.

- Sohel, M.R., Khaleduzzaman, S.S., Saidur, R., Hepbasli, A., Sabri, M.F.M., Mahbubul, I.M. (2014) An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 74, 164-172.
- Toprak, B.İ., Baghaei Oskoue, S., Bayer, Ö., Solmaz, İ. (2022) Experimental and numerical investigation of a novel pipe-network mini channel heatsink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 136, 106212.
- Vasilev, M.P., Abiev, R.S., Kumar, R. (2021) Effect of circular pin-fins geometry and their arrangement on heat transfer performance for laminar flow in microchannel heat sink, *International Journal of Thermal Sciences*, 170, 107177.
- Wang, Y., Zhu, K., Cui, Z., Wei, J. (2019) Effects of the location of the inlet and outlet on heat transfer performance in pin fin CPU heat sink, *Applied Thermal Engineering*, 151, 506-513.
- Xia, G.D., Liu, R., Wang, J., Du, M. (2016) The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using Al_2O_3 and TiO_2 nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 256-264.
- Xu, M., Lu, H., Gong, L., Chai, J.C., Duan, X. (2016) Parametric numerical study of the flow and heat transfer in microchannel with dimples,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 348-357.
- Yang, S., Cao, B., Wu, Z., Hong, S., Xu, H., Sheng, K. (2026) Experimental study of a SiC manifold microchannel heat sink under background and hotspot heating scenarios at ultra-high heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 254, 127657.



DİJİTAL VERİ MERKEZİ GELİŞTİRİLMESİ İÇİN BIM TABANLI ENTEGRE PROJE YÖNETİMİ



Zuhal OKTAY¹

Özlem ŞAHİN²

Can COSKUN³

¹ Yıldız Technical University, Institute of Clean Energy Technologies, Department of Advanced Energy Technologies, Istanbul, Türkiye, z.oktay@yildiz.edu.tr

² <https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>, ozlem.sahin1@std.yildiz.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0001-7599-2927>

³ Yıldız Technical University, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye, c.coskun@idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü son yıllarda dijitalleşme, veri odaklı yönetim ve sürdürülebilirlik kavramlarının etkisiyle önemli bir dönüşüm sürecine girmiştir. Geleneksel proje yönetimi yaklaşımlarında karşılaşılan koordinasyon eksiklikleri, zaman ve maliyet aşırımları ile tasarım–uygulama uyumsuzlukları, dijital teknolojilerin proje süreçlerine entegrasyonunu zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling – BIM), proje yaşam döngüsü boyunca bilgi akışını dijital ortamda yönetmeye olanak sağlayan bütünlük bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Sacks ve ark., 2018).

BIM teknolojisi sayesinde mimari, statik, mekanik ve elektrik disiplinleri tek bir dijital model üzerinde eş zamanlı olarak çalışabilmekte; böylece proje süreçlerinde koordinasyon, doğruluk ve verimlilik önemli ölçüde artırılmaktadır. Bununla birlikte BIM yalnızca bir modelleme aracı değil, aynı zamanda proje yönetimi süreçlerini destekleyen stratejik bir bilgi yönetim sistemi haline gelmiştir (Wang ve Chen, 2023).

Özellikle veri merkezi projeleri, yüksek teknik karmaşıklıkları, yoğun mekanik ve elektrik altyapıları ile kesintisiz işletme gereksinimleri nedeniyle inşaat sektöründeki en kritik yapı türlerinden biridir. Bu projelerde küçük tasarım veya koordinasyon hataları dahi ciddi maliyet kayıplarına ve operasyonel risklere yol açabilmektedir. Bu nedenle veri merkezi projelerinde etkin proje yönetimi ve disiplinler arası koordinasyon büyük önem taşımaktadır (U.S. Department of Energy, 2024).

BIM tabanlı proje yönetimi, veri merkezi projelerinde bu karmaşıklığın yönetilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. 4D BIM ile zaman planlaması, 5D BIM ile maliyet yönetimi, çakışma tespiti ve dijital koordinasyon süreçleri sayesinde proje performansı artırılabilir. Ayrıca BIM tabanlı sistemler, yalnızca tasarım ve yapım aşamalarında değil, işletme ve bakım süreçlerinde de veri sürekliliği sağlayarak yaşam döngüsü yönetimini desteklemektedir.

Son yıllarda sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği kavramlarının önem kazanmasıyla birlikte BIM teknolojileri, veri merkezi projelerinde enerji analizi, termal performans değerlendirmesi ve dijital ikiz uygulamaları ile birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum BIM'in yalnızca geometrik modelleme değil, aynı zamanda karar destek ve optimizasyon aracı olarak da değerlendirildiğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında BIM tabanlı veri merkezi projelerinde proje yönetimi süreçleri incelenmekte; BIM kullanımının planlama, koordinasyon, maliyet yönetimi ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Ayrıca veri merkezi projelerinde karşılaşılan temel yönetim problemleri ve BIM'in bu problemlere sunduğu çözümler literatür temelli olarak analiz edilmektedir.

2. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ

2.1 BIM ve Proje Yönetimi Entegrasyonu

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), inşaat sektöründe son yıllarda yalnızca üç boyutlu modelleme yaklaşımı olarak değil; proje yaşam döngüsü boyunca bilgi yönetimini destekleyen bütünlüklü bir proje yönetim sistemi olarak değerlendirilmektedir. Sacks ve arkadaşları (Sacks ve ark., 2018), BIM'in proje süreçlerinde veri paylaşımı, koordinasyon ve bilgi yönetimini geliştirdiğini belirtmektedir. Özellikle karmaşık projelerde disiplinler arası bilgi akışının daha etkin yönetildiği vurgulanmaktadır.

ISO 19650 standardı, BIM tabanlı süreçlerde ortak veri ortamı ve sistematik bilgi yönetimini esas alan bir çerçeve sunmaktadır (ISO, 2018). Bu standart, proje paydaşları arasında bilgi paylaşımının düzenli ve kontrollü şekilde yürütülmesini amaçlamaktadır.

Son yıllarda BIM ile proje yönetimi entegrasyonu akademik literatürde giderek daha fazla ele alınmaktadır. Wang ve Chen (Wang ve Chen, 2023), BIM'in proje yaşam döngüsü boyunca proje yönetim süreçleriyle daha bütünlüklü hale geldiğini belirtmiştir. Bu kapsamda özellikle zaman yönetimi, veri koordinasyonu ve süreç kontrolü açısından BIM kullanımının önem kazandığı ifade edilmektedir.

BIM'in benimsenmesini etkileyen faktörler de literatürde önemli bir araştırma alanıdır. Ahmed ve Kassem (Ahmed ve Kassem, 2018), BIM kullanımının organizasyonel yapı, teknik altyapı, eğitim düzeyi ve yönetim desteği gibi unsurlardan etkilendiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, BIM uygulamalarında başarıyı belirleyen temel unsurların kullanıcı eğitimi, veri standardizasyonu ve koordinasyon yönetimi olduğu ifade edilmektedir (Succar ve ark., 2012). Bu bulgular, BIM'in yalnızca bir yazılım teknolojisi değil, aynı zamanda organizasyonel bir dönüşüm süreci olduğunu göstermektedir.

2.2 5D BIM, MEP Koordinasyonu ve Çakışma Yönetimi

5D BIM üzerine yapılan çalışmalar, BIM'in maliyet ve zaman boyutlarını proje performansı ile bütünleştirdiğini göstermektedir. Sun ve arkadaşları (Sun ve ark., 2024), 5D BIM benimsenmesini etkileyen faktörleri teknoloji, organizasyon, çevre, operatör ve kamu politikası gibi başlıklar altında incelemiş; maliyet, zaman ve kalite açısından proje performansına katkı sağladığını ortaya koymuştur.

MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) sistemleri, BIM tabanlı koordinasyon süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Teo ve arkadaşları (Teo ve ark., 2022), BIM'in MEP koordinasyonunda üretkenlik, doğruluk ve verimlilik artışı sağladığını ve proje maliyetlerini düşürdüğünü belirtmiştir. Bu kapsamda BIM, çakışma tespiti ve yeniden işleme oranını azaltan önemli bir araçtır.

Güncel çalışmalar, MEP tasarımında algoritmik yaklaşımların BIM ile birlikte kullanımının arttığını göstermektedir. Deng ve arkadaşları (Deng ve ark., 2025), MEP sistemlerinin otomatik yerleşimi için geliştirilen optimizasyon algoritmalarının BIM ile entegre edilmesinin yeni bir araştırma alanı oluşturduğunu ifade etmektedir. Bu yaklaşım, BIM tabanlı süreçlerin yalnızca modelleme değil aynı zamanda optimizasyon süreçlerini de kapsadığını göstermektedir.

Ayrıca Kim ve arkadaşları (Kim ve ark., 2020), BIM tabanlı çakışma yönetiminin proje süresini kısalttığını ve maliyetleri azalttığını belirtmiştir. Golabchi ve arkadaşları (Golabchi ve ark., 2016) ise BIM destekli otomatik çakışma tespitinin saha koordinasyonunu güçlendirdiğini ve uygulama hatalarını azalttığını ifade etmektedir.

2.3 Veri Merkezi Özelinde BIM, Termal Yönetim ve Dijital İkiz Uygulamaları

Veri merkezleri, yüksek enerji yoğunluğu ve karmaşık teknik altyapıları nedeniyle BIM uygulamalarının kritik olduğu yapılardır. Bu yapılarda enerji yönetimi, termal performans ve sistem koordinasyonu büyük önem taşımaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE), veri merkezi tasarımında IT sistemleri, soğutma, hava yönetimi ve güç altyapısının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (U.S. Department of Energy, 2024). Bu nedenle BIM, veri merkezlerinde yalnızca tasarım değil aynı zamanda enerji yönetimi süreçlerinde de kullanılmaktadır.

Pogorelskiy ve Kocsis (Pogorelskiy ve Kocsis, 2023), BIM ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) entegrasyonunun veri merkezlerinde termal yönetimi geliştirdiğini, ancak bu alanın literatürde henüz yeterince gelişmediğini belirtmiştir. Özellikle sıcak-soğuk koridor optimizasyonu ve hava akışı analizlerinin enerji verimliliği açısından kritik olduğu ifade edilmektedir.

Yuan ve arkadaşları (Yuan ve ark., 2025), veri merkezi dijital ikizlerinde yapay zekâ destekli termal yönetim sistemlerinin PUE değerini düşürdüğünü ve enerji verimliliğini artırdığını ortaya koymuştur. Lu et al. (Lu ve ark., 2020) ise BIM ve dijital ikiz entegrasyonunun tesis yönetimi süreçlerini geliştirdiğini belirtmektedir.

Bu gelişmeler, BIM'in veri merkezi projelerinde yalnızca geometrik koordinasyon değil, aynı zamanda enerji performansı ve işletme optimizasyonu açısından da stratejik bir araç haline geldiğini göstermektedir.

2.4 Literatürden Çıkan Araştırma Boşluğu

İncelenen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, BIM'in inşaat sektöründe proje yönetimi ile entegrasyonunun giderek güçlendiği; özellikle 5D

BIM, MEP koordinasyonu, çakışma yönetimi ve dijital ikiz uygulamalarının önemli araştırma alanları haline geldiği görülmektedir (Sun ve ark., 2024; Wang ve Chen, 2023; Teo ve ark., 2022; Deng ve ark., 2025; Yuan ve ark., 2025). Bu çalışmalar, BIM'in proje süreçlerinde zaman, maliyet ve koordinasyon performansını artırdığını ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, mevcut literatür çoğunlukla BIM'in belirli fonksiyonlarına (örneğin çakışma tespiti, maliyet yönetimi veya modelleme süreçleri) odaklanmaktadır. Veri merkezi gibi yüksek teknik karmaşıklığa sahip yapılarda BIM'in proje yönetimi açısından bütünlük etkisini ele alan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır.

Özellikle veri merkezi projelerinde BIM'in yalnızca tasarım ve koordinasyon aracı olarak değil, aynı zamanda zaman yönetimi, maliyet kontrolü, sürdürülebilirlik performansı ve işletme süreçlerini kapsayan uçtan uca bir proje yönetim sistemi olarak değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Ancak literatürde bu bütüncül yaklaşımı sistematik olarak ele alan çalışmalar yeterli düzeyde değildir.

Ayrıca BIM'in veri merkezi projelerinde işletme ve bakım süreçlerine etkisini inceleyen çalışmaların da sınırlı olduğu tespit edilmiştir (Yuan ve ark., 2025; Lu ve ark., 2020). Bu durum, BIM'in proje yaşam döngüsünün yalnızca tasarım ve inşaat aşamalarında değil, işletme aşamasında da nasıl değer ürettiğine ilişkin araştırma ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, veri merkezi projelerinde BIM tabanlı proje yönetiminin tüm yaşam döngüsü boyunca etkilerini birlikte ele alan, özellikle tasarım–inşaat–işletme entegrasyonunu bütüncül şekilde değerlendiren çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu araştırma boşluğunu doldurmayı ve BIM'in veri merkezi projelerinde proje yönetimi performansına etkisini kapsamlı biçimde analiz etmeyi amaçlamaktadır.

3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ ve UYGULAMA YAKLAŞIMI

3.1 Araştırma Tasarımı

Bu çalışmada, BIM (Building Information Modeling) tabanlı proje yönetimi yaklaşımının veri merkezi inşaat projelerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Araştırma süreci, veri merkezi projelerinin yüksek teknik karmaşıklığı, yoğun MEP altyapısı ve disiplinler arası koordinasyon gereksinimi dikkate alınarak yapılandırılmıştır.

Çalışma yalnızca literatür incelemesine dayandırılmamış, BIM süreçlerinin proje yönetimi performansı üzerindeki etkilerinin teknik ve süreç bazlı analizi de kapsam içine alınmıştır. Bu doğrultuda BIM teknolojilerinin proje yaşam döngüsündeki kullanım alanları sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Araştırmada özellikle aşağıdaki temel proje yönetimi problemleri ele alınmıştır:

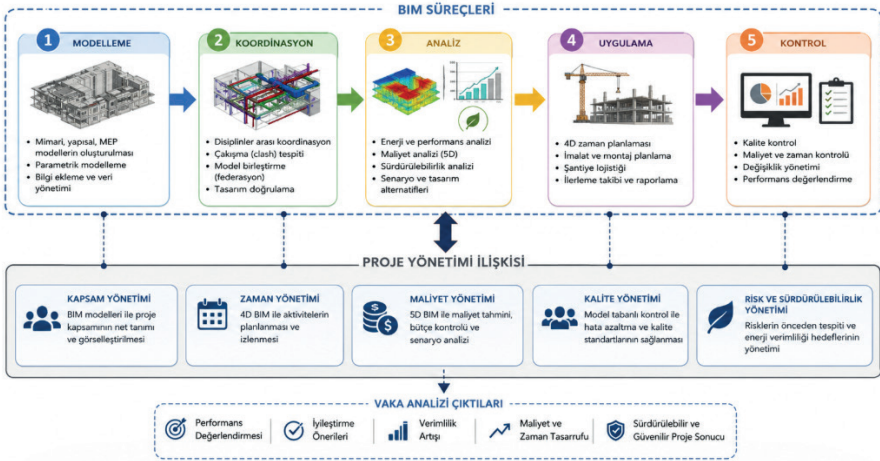
- ◆ Disiplinler arası koordinasyon sorunları
- ◆ Mekanik ve elektrik sistem çakışmaları
- ◆ İş programı yönetimi
- ◆ Maliyet kontrol süreçleri
- ◆ Sürdürülebilirlik ve enerji yönetimi

Ayrıca BIM yazılımlarının proje süreçlerine katkıları teknik açıdan değerlendirilmiştir.

3.1.1 Vaka Analizi Yaklaşımı

Bu çalışmada vaka analizi yaklaşımı benimsenmiştir. Vaka analizi, belirli bir proje türünün detaylı şekilde incelenmesine olanak sağlayan nitel bir araştırma yöntemidir. Veri merkezi projeleri, yüksek mühendislik karmaşıklığı ve çok disiplinli yapısı nedeniyle bu yaklaşım için uygun bir çalışma alanı oluşturmaktadır.

Vaka analizi kapsamında BIM uygulamalarının proje yaşam döngüsü içerisindeki etkileri bütüncül olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşımın genel çerçevesi Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. BIM tabanlı vaka analizi yaklaşımı, (Sacks ve ark., 2018; Wang ve Chen, 2023; Teo ve ark., 2022) kullanılarak oluşturulmuştur.

Şekilde BIM süreçlerinin modelleme, koordinasyon, analiz, uygulama ve kontrol aşamaları ile proje yönetimi arasındaki ilişki ortaya konulmaktadır. Bu yapı, BIM’in yalnızca bir modelleme aracı değil, aynı zamanda proje yönetimini destekleyen bütünlük bir sistem olduğunu göstermektedir.

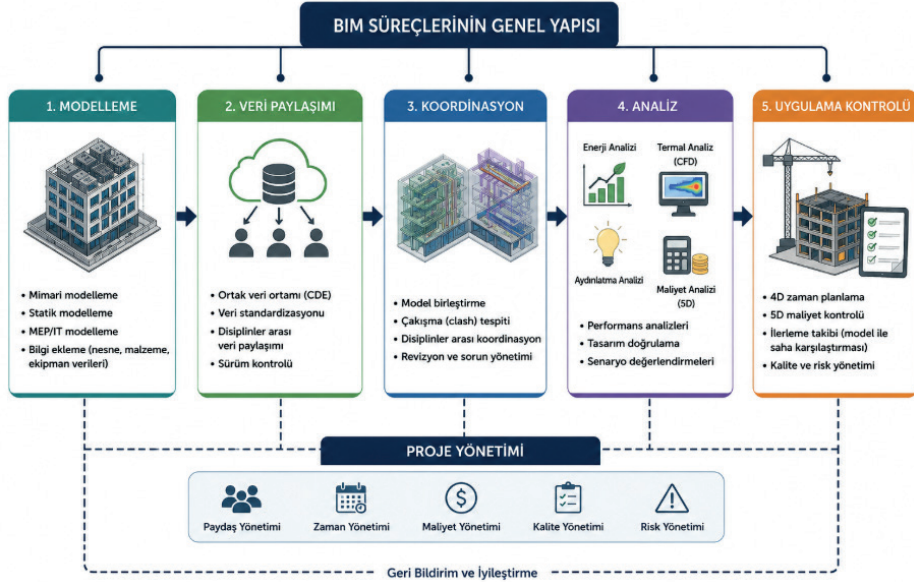
3.1.2 Literatür Tabanlı İnceleme

Çalışmada literatür destekli inceleme yöntemi kullanılarak BIM tabanlı proje yönetimi süreçleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda akademik çalışmalar, teknik standartlar ve sektör raporları analiz edilmiştir.

Literatürde BIM'in özellikle proje yönetimi entegrasyonu, 5D BIM uygulamaları, MEP koordinasyonu, OpenBIM veri paylaşımı ve dijital ikiz teknolojileri gibi alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir.

3.2 BIM Tabanlı Proje Süreçleri

BIM süreçleri, yalnızca üç boyutlu modelleme değil; proje yaşam döngüsü boyunca veri yönetimi, koordinasyon, analiz ve kontrol süreçlerinin bütünlük şeklinde yürütülmesini kapsamaktadır. Veri merkezi projelerinde bu süreçler, proje yönetimi performansını doğrudan etkileyen temel unsurlar arasındadır. BIM süreçlerinin genel yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. BIM süreçlerinin genel yapısı, (Sacks ve ark., 2018; ISO, 2018; Wang ve Chen, 2023; Teo ve ark., 2022) kullanılarak oluşturulmuştur.

Bu yapı, modelleme, veri paylaşımı, koordinasyon, analiz ve uygulama kontrolü aşamalarının proje yönetimi ile ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu sayede proje sürecinde oluşan tüm değişiklikler disiplinler arasında eş zamanlı olarak güncellenebilmektedir.

3.2.1 BIM Modelleme Süreçleri

Modelleme, BIM tabanlı proje yönetiminin temel aşamasıdır. Bu aşamada mimari, statik, mekanik, elektrik ve IT altyapı sistemlerine ait tüm bileşenler dijital ortamda oluşturulmaktadır.

Veri merkezi projelerinde modelleme süreçleri özellikle yoğun MEP sistemleri nedeniyle kritik öneme sahiptir. Bu süreçte oluşturulan BIM modelleri yalnızca görselleştirme amacıyla değil, aynı zamanda merkezi veri yönetim sistemi olarak kullanılmaktadır.

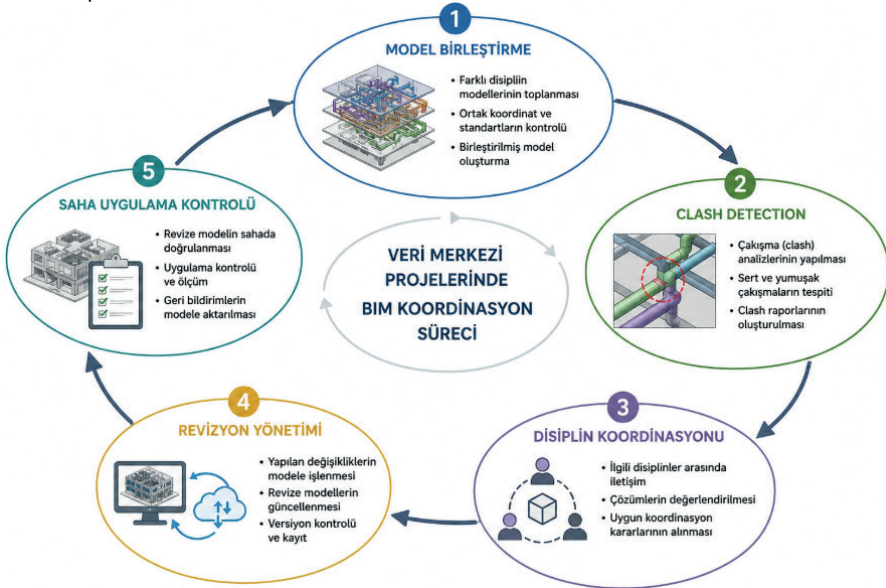
Modelleme süreci sayesinde:

- ◆ Disiplinler arası çakışmalar erken aşamada tespit edilir
- ◆ Veri tutarlılığı sağlanır
- ◆ Tasarım değişiklikleri tüm modele otomatik olarak yansıtılır

3.2.2 BIM Koordinasyon ve Entegrasyon Süreçleri

Koordinasyon süreçleri BIM tabanlı proje yönetiminin en kritik aşamalarından biridir. Veri merkezi projelerinde mimari, mekanik, elektrik ve IT altyapılarının aynı anda yönetilmesi gerektiğinden disiplinler arası koordinasyon büyük önem taşımaktadır.

Bu süreçte farklı disiplinlere ait modeller ortak veri ortamında birleştirilir ve çakışma analizleri gerçekleştirilir. Bu yaklaşımın genel yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Veri merkezi projelerinde BIM koordinasyon süreci, (Teo ve ark., 2022; Jin ve Li, 2023; Kim ve ark., 2020)

Şekilde, disiplin modellerinin birleştirilmesi, çakışma tespiti işlemleri ve çözüm döngüsü gösterilmektedir. Bu süreç, proje süresince olası çakışmaların saha aşamasına geçmeden çözülmesini sağlar.

3.3 Veri Merkezi Proje Yaşam Döngüsü ve Yönetimi

Veri merkezi projeleri; yüksek teknik gereksinimleri, kesintisiz işletme zorunluluğu ve yoğun disiplinler arası etkileşim nedeniyle karmaşık proje yönetim süreçleri gerektiren yapılardır. Bu projelerde mimari, statik, mekanik, elektrik ve IT altyapı sistemleri birbirine bağlı şekilde ilerlemekte ve proje yaşam döngüsü boyunca sürekli koordinasyon gerektirmektedir.

BIM teknolojileri, bu karmaşık yapının yönetilmesinde bilgi bütünlüğünün sağlanması, disiplinler arası koordinasyonun artırılması ve proje süreçlerinin dijital ortamda kontrol edilmesi açısından önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Sacks ve ark., 2018; Wang ve Chen, 2023). BIM tabanlı modeller, yalnızca tasarım verilerini değil; zaman planlaması, maliyet bilgileri ve saha uygulama verilerini de içerecek şekilde proje yaşam döngüsünü desteklemektedir.

Veri merkezi proje yaşam döngüsü kapsamında BIM kullanımı aşağıdaki aşamalarda ele alınmaktadır:

3.3.1 Tasarım Aşaması

Tasarım aşaması, veri merkezi projelerinde proje başarısını doğrudan etkileyen en kritik evrelerden biridir. Bu aşamada mimari, statik, mekanik, elektrik ve IT altyapı sistemleri eş zamanlı olarak geliştirilir ve disiplinler arası uyum sağlanması hedeflenir.

BIM tabanlı tasarım yaklaşımı sayesinde tüm disiplinler ortak bir dijital model üzerinde çalışabilmekte, böylece bilgi tutarsızlıkları ve tasarım hataları önemli ölçüde azaltılmaktadır (Eastman ve ark., 2018). Özellikle yoğun MEP sistemlerine sahip veri merkezi projelerinde BIM kullanımı, tasarım doğruluğunu artırmakta ve uygulama öncesi hata tespitini mümkün kılmaktadır (Teo ve ark., 2022).

Ayrıca OpenBIM yaklaşımı ile farklı yazılımlar arasında veri paylaşımı sağlanarak disiplinler arası iş birliği güçlendirilmekte ve tasarım süreçleri daha entegre bir yapıya kavuşmaktadır (Jin ve Li, 2023).

3.3.2 Koordinasyon Aşaması

Koordinasyon aşaması, veri merkezi proje yönetiminde en yoğun disiplin etkileşiminin yaşandığı süreçtir. Mekanik sistemler, elektrik altyapıları, kablolama sistemleri ve HVAC bileşenlerinin aynı hacim içerisinde bulunması, çakışma riskini artırmaktadır.

BIM tabanlı koordinasyon süreçlerinde farklı disiplinlere ait modeller ortak veri ortamında birleştirilmekte ve çakışma tespiti analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu sayede olası çakışmalar uygulama aşamasına geçilmeden önce tespit edilerek giderilebilmektedir (Teo ve ark., 2022; Kim ve ark., 2020).

Kim ve arkadaşları (Kim ve ark., 2020), BIM tabanlı otomatik çıkışma tespitinin proje süresini kısalttığını ve saha uygulama hatalarını azalttığını belirtmiştir. Ayrıca OpenBIM yaklaşımı, ortak veri ortamı (CDE) üzerinden disiplinler arası veri paylaşımını kolaylaştırarak koordinasyon kalitesini artırmaktadır (Jin ve Li, 2023).

3.3.3 Yapım Aşaması

Yapım aşaması, BIM tabanlı planlamanın saha uygulamalarına dönüştüğü evredir. Bu süreçte BIM modelleri ile saha ilerleme verileri karşılaştırılarak proje kontrolü sağlanmaktadır.

4D BIM uygulamaları sayesinde iş programı ile model entegrasyonu kurularak inşaat süreci dijital ortamda takip edilebilmektedir (Sun ve ark., 2024). Bu durum özellikle veri merkezi projelerinde zaman yönetimi ve saha lojistiğinin daha etkin yapılmasını sağlamaktadır.

BIM kullanımı yapım aşamasında şu katkıları sağlamaktadır:

- ◆ Saha koordinasyonunun geliştirilmesi
- ◆ Revizyon süreçlerinin hızlandırılması
- ◆ Uygulama hatalarının azaltılması
- ◆ İlerleme takibinin dijitalleşmesi

Ayrıca BIM modelleri üzerinden yapılan karşılaştırmalar, kalite kontrol süreçlerini destekleyerek tasarım–uygulama uyumunu artırmaktadır (Wang ve Chen, 2023).

3.3.4 İşletmeye Alma ve Teslim Süreci

İşletmeye alma aşaması, veri merkezi projelerinde sistem performansının doğrulanması açısından kritik bir evredir. Bu süreçte mekanik, elektrik, yangın ve IT altyapı sistemleri test edilmekte ve tasarım kriterlerine uygunluğu kontrol edilmektedir.

BIM tabanlı veri yönetimi sayesinde sistem bilgileri dijital ortamda takip edilebilmekte ve devreye alma süreçleri daha sistematik şekilde yürütülebilmektedir (ISO, 2018).

Son yıllarda dijital ikiz teknolojilerinin BIM ile entegrasyonu, işletme aşamasında gerçek zamanlı veri yönetimini mümkün hale getirmiştir. Yuan ve arkadaşları (Yuan ve ark., 2025), dijital ikiz tabanlı sistemlerin veri merkezlerinde sıcaklık kontrolü ve enerji performansını iyileştirdiğini belirtmiştir.

Lu ve arkadaşları (Lu ve ark., 2020), BIM ve dijital ikiz entegrasyonunun tesis yönetimi süreçlerini güçlendirdiğini ifade etmektedir.

Bu aşamada BIM kullanımının temel katkıları şunlardır:

- ◆ Sistem test ve doğrulama süreçlerinin hızlanması
- ◆ Bakım ve işletme verilerinin dijital yönetimi
- ◆ Enerji performansının izlenmesi
- ◆ Operasyon süreçlerinde karar destek sağlanması

Bu durum BIM'in yalnızca tasarım ve yapım aşamalarında değil, aynı zamanda tesis yönetimi ve işletme süreçlerinde de etkin bir araç olduğunu göstermektedir.

3.4 Kullanılan BIM Yazılımları ve Dijital Araçlar

BIM tabanlı proje yönetimi süreçlerinde kullanılan dijital araçlar, veri merkezi projelerinde modelleme, koordinasyon, analiz, veri paylaşımı ve işletme süreçlerinin bütünleşik biçimde yürütülmesini sağlamaktadır. Veri merkezi projelerinin yüksek teknik karmaşıklığı ve disiplinler arası yoğun etkileşimi, farklı yazılımların entegre şekilde kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda BIM yazılımları yalnızca üç boyutlu model üretmek için değil; aynı zamanda proje yönetimi, çakışma analizi, maliyet kontrolü, ortak veri ortamı oluşturma ve dijital işletme süreçlerinin desteklenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Sacks ve ark., 2018; Wang ve Chen, 2023).

Veri merkezi projelerinde en yaygın kullanılan BIM araçları Revit, Navisworks ve BIM 360 olup; bunlara ek olarak CFD analiz yazılımları ve dijital ikiz platformları da proje yaşam döngüsünün farklı aşamalarında kullanılmaktadır.

3.4.1 BIM Modelleme ve Tasarım Araçları

BIM tabanlı modelleme süreçlerinde en yaygın kullanılan yazılımlardan biri Revit'tir. Revit, mimari, statik, mekanik ve elektrik disiplinlerinin tek bir entegre model üzerinde çalışmasına imkân tanıyan parametrik bir BIM yazılımıdır.

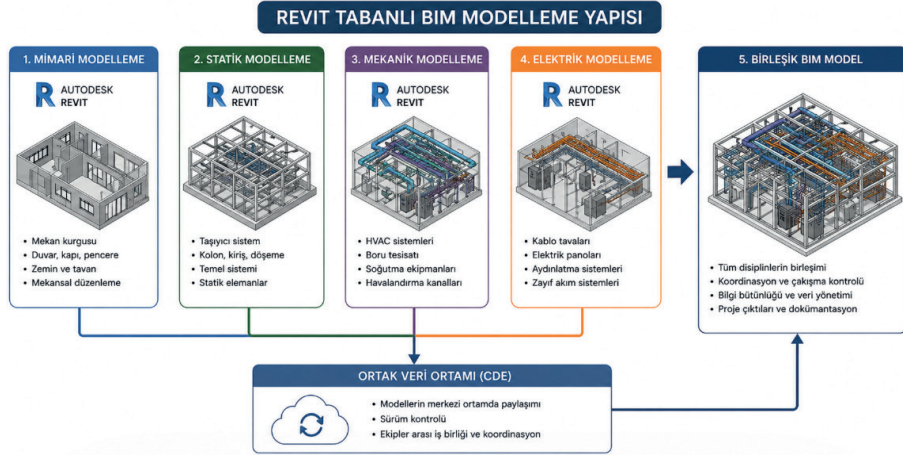
Veri merkezi projelerinde yoğun MEP sistemleri nedeniyle Revit kullanımı, disiplinler arası koordinasyonun sağlanması ve tasarım doğruluğunun artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Revit üzerinden oluşturulan modeller yalnızca geometrik verilerden ibaret olmayıp; malzeme özellikleri, ekipman bilgileri ve teknik parametreleri de içermektedir (Sacks ve ark., 2018).

Veri merkezi projelerinde Revit kullanımının temel alanları şunlardır:

- ◆ Mimari modelleme
- ◆ Mekanik sistem tasarımı
- ◆ Elektrik altyapı modelleme

- ◆ Kablo tavası ve borulama sistemleri
- ◆ Ekipman yerleşim planlaması

Revit tabanlı modelleme süreci, BIM koordinasyon altyapısının temeli oluşturulmaktadır. Revit ortamında oluşturulan disiplin modelleri daha sonra koordinasyon analizleri için birleşik BIM modeline aktarılmaktadır.



Şekil 4. Revit tabanlı BIM modelleme yapısı (Sacks ve ark., 2018; Teo ve ark., 2022)

Şekil 4'te Revit tabanlı BIM modelleme yapısı gösterilmektedir. Şekilde mimari, statik, mekanik ve elektrik modellerinin oluşturulması ve birleşik BIM modeline aktarılması süreci gösterilmektedir.

3.4.2 BIM Koordinasyon ve Çakışma Analiz Araçları

Navisworks, BIM tabanlı koordinasyon süreçlerinde kullanılan en önemli yazılımlardan biridir. Farklı disiplinlere ait modellerin tek bir platformda birleştirilmesini ve detaylı çakışma analizlerinin yapılmasını sağlamaktadır.

Veri merkezi projelerinde mekanik, elektrik, HVAC ve kablolama sistemlerinin aynı fiziksel alan içerisinde yoğun şekilde yer alması, çakışma riskini artırmaktadır. Navisworks bu risklerin erken aşamada tespit edilmesine ve giderilmesine imkân tanımaktadır (Teo ve ark., 2022; Kim ve ark., 2020).

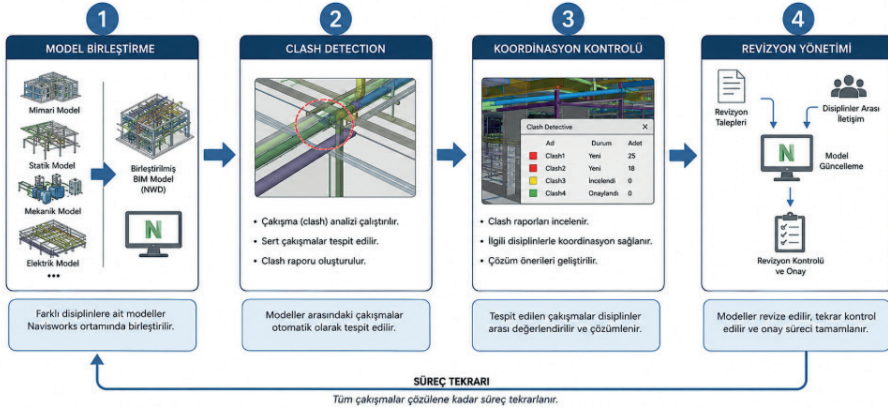
Kim ve arkadaşları (Kim et al., 2020), BIM tabanlı otomatik çakışma tespitinin proje süresini azalttığını ve saha uygulama hatalarını düşürdüğünü belirtmiştir.

Navisworks ile gerçekleştirilen temel süreçler:

- ◆ Model entegrasyonu
- ◆ Çakışma analizi

- ◆ Disiplinler arası koordinasyon kontrolü
- ◆ Revizyon ve hata yönetimi

Bu süreçler veri merkezi projelerinde uygulama öncesi hata riskini önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 5. Navisworks koordinasyon ve çakışma analizi süreci (Teo ve ark., 2022; Kim ve ark., 2020)

Navisworks koordinasyon ve çakışma yönetimi süreci Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekilde farklı disiplin modellerinin birleştirilmesi, çakışmaların tespit edilmesi, çözüm geliştirilmesi ve modelin güncellenmesi aşamaları gösterilmektedir.

3.4.3 Ortak Veri Ortamı ve Dijital Platformlar (BIM 360 ve CDE Sistemleri)

BIM 360, bulut tabanlı bir ortak veri ortamı (Common Data Environment-CDE) sağlayarak proje paydaşları arasında veri paylaşımını ve iş birliğini destekleyen bir platformdur.

Veri merkezi projelerinde BIM 360 kullanımı sayesinde proje dokümanları merkezi olarak yönetilebilmekte, saha ve ofis ekipleri arasında anlık veri paylaşımı sağlanabilmekte ve revizyon süreçleri dijital olarak takip edilebilmektedir.

OpenBIM yaklaşımı ile birlikte BIM 360 benzeri sistemler, farklı disiplinlerin aynı veri ortamında çalışmasına imkân tanıyarak proje koordinasyonunu güçlendirmektedir (Jin ve Li, 2023).

BIM 360 kullanımının temel katkıları:

- ◆ Merkezi doküman yönetimi
- ◆ Gerçek zamanlı veri paylaşımı

- ◆ Revizyon takibi ve kontrolü
- ◆ Saha-ofis koordinasyonu
- ◆ Proje ilerleme takibi

Bu platformlar veri merkezi projelerinde bilgi yönetiminin sürekliliğini sağlayarak proje yaşam döngüsü boyunca veri bütünlüğünü desteklemektedir.

3.4.4 Termal Analiz ve Dijital İkiz Tabanlı Sistemler

Veri merkezi projelerinde enerji verimliliği ve termal performans kritik öneme sahiptir. Bu nedenle CFD (Computational Fluid Dynamics) yazılımları ile hava akışı ve sıcaklık dağılımı analizleri yapılabilmektedir.

Pogorelskiy ve Kocsis (Pogorelskiy ve Kocsis, 2023), BIM ile CFD analizlerinin birlikte kullanımının veri merkezlerinde termal yönetimi geliştirdiğini belirtmiştir. Bu yaklaşım özellikle sıcak-soğuk koridor optimizasyonunda önemli avantajlar sağlamaktadır.

Son yıllarda dijital ikiz teknolojilerinin BIM ile entegrasyonu, veri merkezi işletme süreçlerinde gerçek zamanlı veri analizini mümkün hale getirmiştir. Yuan ve arkadaşları (Yuan ve ark., 2025), dijital ikiz tabanlı sistemlerin sıcaklık kontrolü ve enerji performansını iyileştirdiğini ifade etmektedir. Lu ve arkadaşları (Lu ve ark., 2020) ise BIM ve dijital ikiz entegrasyonunun tesis yönetimi süreçlerini güçlendirdiğini vurgulamaktadır.

Bu teknolojiler sayesinde:

- ◆ Gerçek zamanlı sistem izleme
- ◆ Enerji performansı analizi
- ◆ Termal denge optimizasyonu
- ◆ Akıllı bakım ve işletme yönetimi

gibi süreçler dijital ortamda yürütülebilmektedir.

4. BULGULAR ve DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde, literatür incelemesi ve BIM süreç analizlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar, BIM teknolojilerinin veri merkezi projelerinde zaman yönetimi, maliyet kontrolü, disiplinler arası koordinasyon ve risk yönetimi üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek teknik karmaşıklığa sahip veri merkezi projelerinde BIM, proje performansını doğrudan etkileyen bütünlük bir yönetim aracı haline gelmektedir.

BIM kullanımının veri merkezi projelerindeki en belirgin katkıları; proje süresinin daha etkin yönetilmesi, uygulama aşamasında oluşabilecek reviz-

yonların azaltılması, maliyet kontrolünün geliştirilmesi ve disiplinler arası koordinasyonun iyileştirilmesi olarak öne çıkmaktadır (Sun ve ark., 2024; Wang ve Chen, 2023; Teo ve ark., 2022). Ayrıca dijital ikiz ve OpenBIM uygulamalarının gelişmesiyle birlikte BIM teknolojilerinin yalnızca tasarım ve inşaat aşamalarında değil, işletme süreçlerinde de kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Jin ve Li, 2023; Yuan ve ark., 2025; Lu ve ark., 2020).

Aşağıda, elde edilen bulgular proje yönetimi bileşenleri açısından detaylandırılmıştır.

4.1 BIM'in Proje Süresine Etkisi

Proje süresi, veri merkezi projelerinde en kritik başarı kriterlerinden biridir. Bu tür projelerde yaşanan gecikmeler yalnızca inşaat maliyetlerini artırmamakta, aynı zamanda işletmeye alma süreçlerini de doğrudan etkilemektedir.

Literatürde BIM teknolojilerinin proje süresinin yönetilmesine önemli katkılar sağladığı belirtilmektedir. Özellikle 4D BIM uygulamaları sayesinde iş programı ile üç boyutlu model entegre edilmekte ve proje ilerleme süreci görselleştirilebilmektedir (Wang ve Chen, 2023). Bu durum, proje ekiplerinin olası gecikmeleri erken aşamada tespit etmesine olanak sağlamaktadır.

Sun ve arkadaşları (Sun ve ark., 2024), BIM tabanlı uygulamaların zaman yönetimi performansını iyileştirdiğini belirtmiş; Kim ve arkadaşları (Kim ve ark., 2020) ise BIM destekli çakışma tespitinin uygulama öncesinde sorunları belirleyerek proje süresine olumlu katkı sağladığını ifade etmiştir (Sun ve ark., 2024; Kim ve ark., 2020).

4.2 BIM'in Maliyet Yönetimine Etkisi

Veri merkezi projeleri, yüksek yatırım maliyetlerine sahip kompleks yapılarıdır. Güç sistemleri, UPS altyapıları, soğutma sistemleri ve IT ekipmanları proje bütçesinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle maliyet yönetimi kritik bir proje yönetimi bileşenidir.

5D BIM uygulamaları sayesinde maliyet verileri dijital modele entegre edilerek bütçe kontrolü daha sistematik hale getirilebilmektedir (Sun ve ark., 2024). Ayrıca tasarım değişikliklerinin maliyet etkileri daha hızlı ve doğru şekilde analiz edilebilmektedir.

Sun ve arkadaşları (Sun ve ark., 2024), 5D BIM uygulamalarının maliyet performansını artırdığını belirtmiş; BIM tabanlı koordinasyon süreçlerinin ise revizyon kaynaklı maliyet artışlarını azalttığını göstermiştir (Sun ve ark., 2024; Teo ve ark., 2022).

4.3 MEP Koordinasyonuna Katkılar

Veri merkezi projelerinde MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) sistemleri, en karmaşık proje bileşenlerini oluşturmaktadır. Mekanik, elektrik, yangın koruma ve IT altyapılarının aynı hacim içerisinde yoğun şekilde yer alması, disiplinler arası koordinasyonu kritik hale getirmektedir. Teo ve arkadaşları (Teo ve ark., 2022), BIM tabanlı koordinasyon süreçlerinin MEP sistemleri arasındaki çakışmaları azalttığını ve proje verimliliğini artırdığını belirtmiştir (Teo ve ark., 2022). Kim ve arkadaşları (Kim ve ark., 2020) ise otomatik çakışma analizi süreçlerinin uygulama öncesinde sorunları tespit ederek saha hatalarını azalttığını ifade etmiştir (Kim ve ark., 2020).

OpenBIM yaklaşımı da koordinasyon süreçlerine önemli katkı sağlamaktadır. Jin ve Li (Jin ve Li, 2023), ortak veri ortamı üzerinden yürütülen iş birliğinin disiplinler arası koordinasyonu güçlendirdiğini belirtmiştir (Jin ve Li, 2023).

4.4. Veri Merkezi Projelerinde Risk Yönetimi

Risk yönetimi, veri merkezi projelerinde proje başarısını doğrudan etkileyen temel bileşenlerden biridir. Yüksek teknik karmaşıklık, büyük yatırım maliyetleri ve kesintisiz işletme gereksinimleri nedeniyle risklerin erken aşamada tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. BIM teknolojileri risk yönetimi süreçlerinde özellikle tasarım doğrulama, çakışma kontrolü ve performans analizleri açısından kullanılmaktadır (Sacks ve ark., 2018; Wang ve Chen, 2023). Çakışma tespiti uygulamaları sayesinde birçok potansiyel sorun uygulama öncesinde belirlenebilmektedir (Teo ve ark., 2022; Kim ve ark., 2020). Veri merkezlerinde enerji ve termal performans da önemli risk alanları arasında yer almaktadır. Pogorelskiy ve Kocsis (Pogorelskiy ve Kocsis, 2023), BIM ile CFD analizlerinin birlikte kullanımının termal performans değerlendirmesine katkı sağladığını belirtmiştir. Yuan ve arkadaşları (Yuan ve ark., 2025) ise dijital ikiz teknolojilerinin gerçek zamanlı izleme ve enerji optimizasyonu süreçlerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Bu bölümde elde edilen bulgular, BIM teknolojilerinin veri merkezi projelerinde proje performansını zaman, maliyet, koordinasyon ve risk yönetimi açısından önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle yüksek teknik yoğunluğa sahip veri merkezi projelerinde BIM, proje performansını artıran bütünsel bir yönetim aracı olarak öne çıkmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuç

Bu çalışmada, BIM tabanlı proje yönetimi yaklaşımının veri merkezi inşaat projelerindeki etkileri literatür incelemesi ve süreç analizi kapsamında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, BIM teknolojisinin veri merkezi

projelerinde yalnızca bir modelleme aracı değil, aynı zamanda proje yönetimini bütüncül olarak destekleyen bir dijital yönetim yaklaşımı olduğunu ortaya koymaktadır.

Veri merkezi projeleri; yüksek teknik karmaşıklık, yoğun MEP sistemleri, kesintisiz işletme gereksinimi ve yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle klasik proje yönetim yöntemleri ile yönetilmesi zor yapılardır. Bu nedenle BIM tabanlı yaklaşımlar, bu tür projelerde önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- ◆ BIM teknolojileri, veri merkezi projelerinde disiplinler arası koordinasyonu önemli ölçüde geliştirmektedir.
- ◆ 4D ve 5D BIM uygulamaları sayesinde proje süresi ve maliyet yönetimi daha kontrollü hale gelmektedir.
- ◆ Çakışma analizi ve koordinasyon süreçleri sayesinde tasarım ve uygulama hataları azalmaktadır.
- ◆ BIM, yalnızca tasarım aşamasında değil, yapım ve işletme süreçlerinde de etkin rol oynamaktadır.
- ◆ Dijital ikiz ve OpenBIM yaklaşımları ile birlikte BIM'in işletme ve bakım süreçlerine entegrasyonu güçlenmektedir.
- ◆ Veri merkezi projelerinde enerji verimliliği ve termal yönetim gibi performans kriterleri BIM tabanlı analizlerle daha etkin değerlendirilebilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde BIM teknolojisinin, veri merkezi projelerinde proje yönetimi performansını artıran kritik bir araç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda hem akademik araştırmalara hem de sektör uygulamalarına yönelik çeşitli öneriler geliştirilmiştir.

(i) Akademik Öneriler

- ◆ Veri merkezi projelerinde BIM uygulamalarının etkileri üzerine daha fazla ampirik (saha verisine dayalı) çalışma yapılması gerekmektedir.
- ◆ BIM ile yapay zekâ, makine öğrenmesi ve dijital ikiz teknolojilerinin entegrasyonu üzerine araştırmalar artırılmalıdır.
- ◆ Özellikle termal performans, enerji verimliliği ve CFD tabanlı BIM analizleri daha detaylı incelenmelidir.
- ◆ BIM'in yalnızca tasarım ve inşaat değil, işletme aşamasındaki etkile-

ri üzerine daha fazla akademik çalışma yapılmalıdır.

- ◆ Veri merkezi projelerine özgü standart BIM proje yönetim modelleri geliştirilmelidir.

(ii) Sektörel Öneriler

- ◆ Veri merkezi projelerinde BIM kullanımı, proje başlangıcından itibaren zorunlu bir proje yönetim standardı haline getirilmelidir.

- ◆ Disiplinler arası koordinasyon için ortak veri ortamı (CDE) sistemleri etkin şekilde kullanılmalıdır.

- ◆ 4D ve 5D BIM uygulamaları, yalnızca tasarım aşamasında değil, saha kontrol süreçlerinde de aktif olarak kullanılmalıdır.

- ◆ Proje ekiplerine yönelik BIM eğitim programları standardize edilmelidir.

- ◆ MEP koordinasyon süreçlerinde çakışma tespiti sistemleri erken aşamada zorunlu kontrol adımı olarak uygulanmalıdır.

- ◆ Veri merkezi işletme süreçlerinde BIM tabanlı dijital ikiz sistemlerine geçiş teşvik edilmelidir.

KAYNAKÇA

- Ahmed, A. L., & Kassem, M. (2018). A unified BIM adoption taxonomy: Conceptual development, empirical validation and application. *Automation in Construction*, 96, 103–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.017>
- Deng, R., Li, X., & Tian, Y. (2025). A review: The application of path optimization algorithms in building mechanical, electrical, and plumbing pipe design. *Buildings*, 15(12), 2093. <https://doi.org/10.3390/buildings15122093>
- Golabchi, A., Akula, M., & Kamat, V. R. (2016). Automated building information modeling for fault detection and diagnostics in commercial HVAC systems. *Automation in Construction*, 71, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.009>
- ISO. (2018). *ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/68078.html>
- Jin, M., & Li, B. (2023). Dual-level framework for OpenBIM-enabled design collaboration. *Buildings*, 13(12), 3031. <https://www.mdpi.com/2075-5305/13/12/3031>
- Kim, H., Anderson, K., Lee, S., & Hildreth, J. (2020). Generating construction schedules through automatic MEP clash detection. *Automation in Construction*, 113, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103128>
- Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., & Schooling, J. M. (2020). Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. *Automation in Construction*, 118, 103277. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103277>
- Pogorelskiy, S., & Kocsis, I. (2023). BIM and computational fluid dynamics analysis for thermal management improvement in data centres. *Buildings*, 13(10), 2636. <https://doi.org/10.3390/buildings13102636>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119287568>
- Sun, H., Khoo, T. J., Esa, M., Mahdiyar, A., & Li, J. (2024). Critical factors driving construction project performance in integrated 5D building information modeling. *Buildings*, 14(9), 2807. <https://doi.org/10.3390/buildings14092807>
- Teo, Y. H., Yap, J. H., An, H., Yu, S. C. M., Zhang, L., Chang, J., & Cheong, K. H. (2022). Enhancing the MEP coordination process with BIM technology and management strategies. *Sensors*, 22(13), 4936. <https://doi.org/10.3390/s22134936>
- Wang, T., & Chen, H. (2023). Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle. *Automation in Construction*, 153, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104832>

Yuan, H., Zhang, Z., Yang, D., Xue, T., Wen, D., & Yao, G. (2025). An intelligent thermal management strategy for a data center prototype based on digital twin technology. *Applied Sciences*, 15(14), 7675. <https://doi.org/10.3390/app15147675>



KÂĞIT ÖZELLİKLERİ VE UYGULANAN TESTLER

“ ”

Zehra YILDIZ¹
Mehmet Gürsel KÖSE²

¹ Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri,
Mersin, zyildiz@tarsus.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1304-4857

² Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Mer-
sin, 240919002@tarsus.edu.tr, Orcid ID:0009-0000-7993-9894

GİRİŞ

Dünyada en çok üretilen ve tüketilen endüstriyel ürünlerden biri olan ülkemizde de önemli bir stratejik konuma sahiptir (Erkan ve Malayoglu, 2001). Günümüzde dijitalleşme ile kâğıt tüketimi azalacağı öngörülse de gelişen teknoloji ile kâğıdın kullanım alanı artmış ve buna bağlı olarak kâğıt tüketimi artmıştır (Yakut, 2012). Kâğıt ürünlerinin hem ekonomik olması hem de kolay işlenmesi sebebiyle özellikle günlük hayatın hemen hemen her alanında yer alan ürünler ve ürünlerin ambalajlanmasında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Cevik, 2016). Odun, yıllık bitkiler ve atık kâğıtlar, mekanik ve kimyasal işlemlerle karton, defter, dosya, kutu, torba, havlu, peçete ve mendil gibi kâğıt ürünlerine dönüşür (Sükan, 2000).

Kâğıt türleri, kullanım alanlarına göre yazı kâğıtları, temizlik kâğıtları, gazete kâğıdı, ambalaj kâğıtları, mukavva ve karton olarak farklı kâğıt türleri vardır. Kullanılan hammaddeye (kâğıt hamuru) göre kâğıt türleri birinci hamur, ikinci hamur ve kuşe kâğıt olmak üzere üç kalite sınıfına ayrılır. Birinci hamur kâğıtların içeriği selüloz ağırlıklıdır. Fotokopi kâğıdı, antetli kâğıt, kitap ve zarflarda birinci hamur kâğıtlar kullanılmaktadır. Saf pamuk lifli kâğıtlardan sonra kalite ve maliyet olarak pamuk içerikli birinci hamur kâğıtlar en iyisidir. Bu kâğıtlar, düşük hızlı kâğıt makinelerinde üretilip hava ile kurutulur. İkinci hamur kâğıtların bileşiminde eşit miktarda odun ve selüloz vardır. İkinci hamur kâğıtların rengi tam beyaz olmadığı için kitaplarda tercih edilir. Kuşe kâğıtlar, mat veya parlak olarak üretilir. Renkli resim baskısında yüzeyi tam beyaz olan kuşe kâğıtlar en iyi sonucu verir (Aslan, 2010).

Kâğıtlar, kaplama işlemi yapılıp yapılmamasına göre kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere ikiye ayrılır. Kaplamalı kâğıt genellikle kaplamalı baskı kâğıt olarak bilinir. Takvimler, posterler, kitap kapakları, illüstrasyonlar, sanat kitapları, resim albümleri, dekorasyon ambalajları, etiketlerde ve broşürlerin hemen hemen hepsinin basılmasında kaplamalı kâğıt kullanılır. Kaplamalı kâğıt, yüksek pürüzsüzlük (600 ~ 1000), %90'dan fazla beyazlık ve iyi bir parlaklığa sahiptir. Kâğıt üretiminde kalite kontrol çok önemlidir. Birçok çeşit kâğıt ve farklı performanslar vardır. Kâğıt ürünün performansı; dayanım, baskı kalitesi, işlenebilirlik ve dayanıklılık gibi kriterlere bağlıdır. Kâğıdın en önemli temel özellikleri fiziksel, kimyasal, optik ve nem ile ilgili özelliklerdir. Kâğıdın fiziksel özellikleri, gramaj, kalınlık, sızdırmazlık, mukavemet, patlama direnci, katlanma direnci, yırtılma direnci, çekme direnci, yüzey düzgünlüğü, emicilik ve porozite gibi özellikleridir. Kâğıdın optik özellikleri, parlaklık, opaklık, beyazlık ve CIE renk parametreleridir. Kâğıdın nem ile ilgili olan özellikler ise %nem, COBB değeri ve su yoludur. Kâğıdın kimyasal özelliklerinde önemli olan pH, kül ve lignin içeriğidir. Kâğıt baskı aşamasında kâğıt-mürekkep-baskı makinesi uyumunda kâğıdın gramajı, kalınlığı, mukavemeti, pürüzlülüğü, nemi, COBB değeri, porozitesi, optik özellikleri, yüzey pH değeri ve su yolu

gibi kâğıt özellikleri çok önemlidir. Üretim sürecinde hem hammadde hem de bitmiş ürün üzerinde tablo1 de verilen çeşitli fiziksel, nem ve optik özellikleri karşılaması istenebilir (URL-1, 2021).

Tablo 1. Yaygın kâğıt türlerinin özellikleri (URL-2, 2022).

Kâğıt türü	Kâğıt özellikleri ve uygulamaları
Kartuş kâğıdı	Dokulu, kalın, opak ve emici, suluboyalarda kullanılır
Düzen kâğıdı	Pürüzsüz yüzey, kırık beyaz renk, yarı saydam, çoğu ortam için uygun
Kopya kâğıdı	Yarı saydam, pürüzsüz parlak, kalem için en uygun
Gazete	Açık beyaz, emici, kısa süreli mürekkep kullanımına uygun
Tahvil kâğıdı	Sert, mürekkep nüfuzuna dayanıklı, ticari uygulamalarda yaygın
Özel kâğıtlar	Sigara kâğıdı gibi ince, fakat mukavemeti yüksek, yüksek emicilik, porozite, yüksek opaklık, düşük gramajlı, aşınma direnci
Karton	Gramajı yüksek tek veya çok katlı genellikle kalın

1. KÂĞIDIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Kâğıtların fiziksel özellikleri kullanım alanlarına göre değişmektedir. Hijyen ve temizlik koşullarının sağlanmasında kullanılan kâğıt ürünlerin özellikle fiziksel özellikleri daha önemlidir. Kâğıdın fiziksel özellikleri, üretim süreci ve yapıldığı odun hamurunun türü ile ilgilidir. Kâğıt üreticilerinin ve kâğıt kullanıcılarının hem üretim hem de baskı sırasında belirlenmesi ve dikkat edilmesi gereken önemli fiziksel özelliklerden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

1.1. Gramaj

Kâğıdın yüksekliği ve tekdüzeliği, kâğıdın tüm fiziksel, mekanik, optik ve baskı özelliklerini etkiler. Bir kâğıt parçasının ağırlığı, ne kadar esnek ve dayanıklı olduğunu belirler. Genel olarak, kalınlık, gerilme mukavemeti, patlama mukavemeti ve opaklık gibi baskı kâğıdının çeşitli performans indeksleri, kantitatif analiz ile yakından ilişkilidir. Kâğıt ağırlığı baskı ve kullanım kalitesini etkilenmemesi için üretim esnasında makinenin en ve boy yönlerinde kontrol edilmelidir (URL-1, 2021). Bir kâğıt yaprağının oranı bir sonraki kâğıt yaprağından farklı olduğunda, bu kâğıt aralığında baskı ayarı yapılamaz, bu da yanlış üst baskı ve farklı baskı derinliğine yol açar. Aynı kâğıdın miktarı tek tip olmadığında, net olmayan yazılara ve tutarsız renge neden olabilir. Kâğıdın birim alan başına kâğıt ağırlığını (g/ m^2) gramajı ifade eder. Ağırlık hassas elektronik terazilerle ölçülmektedir (URL-3, 2025). Kâğıt üretiminde en önemli hususlardan biri bobinin her bölgesindeki gramajın aynı olmasıdır (URL-4, 2025). Kâğıdın bazı fiziksel özellikleri gramaja bağlı olarak değişir. 10-150 gramajındaki ürünler kâğıt, 150-400 gramajındaki ürünler karton ve 400-1200 gramajındaki ürünler mukavva olarak adlandırılır. ISO 536 standardına göre tayin edilir (Özdemir, 2021).

1.2. Kalınlık

Kâğıdın kalınlığı, tek bir kâğıt tabakasının alt ve üst yüzeyi arasındaki uzaklığının mikrometre birimi cinsinden ölçüsüdür. Kâğıt kalınlığı, belirli bir alan ve basınç altında mikrometre veya kumpas ile ölçülebilir. FPS kraliyet birim sistemini kullanan ülkelerde kâğıdın kalınlığını inçin binde biri olan kaliper veya inç başına sayfa sayısı (PPI) olarak belirlenir (Özdemir, 2021). Kâğıdın kalınlığı, kıvrılma sertliği, esneklik ve dayanıklılık üzerinde etkilidir. Ayrıca kâğıt kalınlığı blanket ve mürekkep basıncının ayarlanması açısından da önemlidir. Kâğıdın kalınlık değerleri tüm bobinde aynı olmalıdır. Kâğıt kalınlığı gerek aynı tabakada gerek ise art arda yer alan tabakalarda eşit olmalıdır. Kalınlık değerleri arasındaki farklar ebatlama sırasında kırışmalara ve baskı sırasında mürekkep alımının farklı olmasına dolayısıyla ton farklılıklarına neden olur (URL-4, 2025).

1.3. Sızdırmazlık

Sızdırmazlık, santimetre küp başına kâğıt ve karton ağırlığını ifade eder. Sonuç g / cm^3 olarak ifade edilir. Sızdırmazlık, kâğıt ve kartonun temel özelliği olan kâğıt veya mukavva yapının sıklığını ölçmek için kullanılan bir indekstir (URL-1, 2021).

1.4. Mukavemet

Paket, ambalaj ve torba yapımında kullanılan kâğıtlar için mukavemet çok önemlidir (URL-4, 2025). Mukavemet, kâğıdın kopmadan önce dayandığı birim genişlik başına maksimum kopma direncini ifade eder. Mukavemet, makine yönüne göre kontrol edilir. Makine yönü boy ve makine yönü tersi en olarak bilinir. Mukavemet, baskı öncesi kadar baskı sonrasında da oldukça önemlidir. Dört renk baskıdan sonra mukavemetin minimum %28 artması istenir. Bu artış sağlanmıyorsa kâğıt-mürekkep dengesizliği vardır. Mukavemet değerinde %100'e kadar artış gözlenmektedir (URL-3, 2025).

1.4.1. Patlama direnci

Patlatma direnci, yuvarlak bir cismin maksimum hidrostatik basınç ile kâğıdı delme oranıdır. Makine yönü ve enine yönden etkilenmez. Patlama direnci, TAPPI T 403 om-91 standardına göre kg/cm^2 olarak belirlenir. Kauçuk bir diyafram üzerine daire şeklinde tutturulan filtre kâğıdına içten dışa hava basılarak patlatılır ve patlama anında okunan değer patlatma direncini verir (Özden, 2023). Kâğıdın patlatma direnci, mukavemet ve yapısal sağlamlık için önemlidir (Özdemir vd., 2023).

Patlama İndisi=Patlama Direnci (kgf/cm^2) x 98.06/gramaj eşitliği kullanılarak $kPa.m^2/g$ olarak hesaplanır (Çiçekler, 2012).

1.4.2. Çekme direnci

Kâğıdın çekme direnci, iki uçtan çekilerek kopma noktası ölçülür. TAPPI T414 standardına göre çekme testi yapılır. Kâğıdın çekme direnci, kâğıdın lif yapısı ve mukavemeti için önemlidir. Kâğıt üretimi sırasında lifler yönlendiği için kâğıdın enine ve makine yönündeki direnç özellikleri değişir. Çekme direncinin makine yönü ile enine yönünün oranı arttıkça lif yönlenmesi artar (Özdemir vd., 2023).

1.4.3. Yırtılma Direnci

Yırtılmaya karşı dayanıklılık için önemlidir. Lif yönlenmesi sadece çekme direnci değil yırtılma direnci hakkında bilgi verir. Yüksek yırtılma direnci lif yönlenmesinin fazla olduğunu gösterir (URL-5, 2025). Kâğıdın yırtılma direnci, TAPPI T 414 om-88 standardına göre Elmendorf cihazı ile belirlenir. Kâğıt örnekleri 62x100 mm olacak şekilde kesilir ve sonra ikişerli olarak yırtılma işlemi gerçekleştirilir. Kadrandaki okunan değer aşağıdaki eşitlik yerine konularak ile yırtılma indisi hesaplanır (Çiçekler, 2012).

Yırtılma İndisi = Okunan değer x 3 x 9.81/kâğıt adedi x gramaj eşitliğinden $\text{mN.m}^2/\text{g}^{-1}$ biriminde hesaplanır.

1.4.4. Katlanma Direnci

Kâğıdın katlama direnci, belirli sayıda katlanmaya karşı dayanıklılığı ölçülerek belirlenir. Kitap, harita gibi kâğıt ürünleri için önemlidir. Katlama direnci ISO 2493 standardına göre tayin edilir.

1.4.5. RCT

Halkasal Ezilme Testi (RCT) olup, birimi kN/m^2 'dir. ISO 12192 standardına göre tayin edilir. Lif yönlenmesi fazla olduğunda oluklu mukavva kutuların RCT direnci düşer ve bu durum istenmez (Özdemir vd., 2023).

1.4.6. CCT

Dikey ezilme (CCT), TAPPI T 824 standardına göre tayin edilir. CCT değerini özellikle oluklu mukavva kâğıtlarında lif yönlenmesinin olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Özdemir vd., 2023).

1.4.7. ECT

Kenar ezilme testinde (ECT), kesilmiş kenara dik baskı uygulanır. Koli ve oluklu mukavva dayanımı için önemlidir. ECT değeri, oluklu mukavva türü kâğıdın fiziksel özelliklerine ve dirençlerine göre değişir. Kâğıtların direnç değeri arttıkça oluklu mukavva levhaların kenar ezilme dirençleri de artar (Özdemir vd., 2023).

1.5. Yüzey Düzgünlüğü

Düzgünlük, kâğıdın yüzey durumuna bağlıdır. Kâğıt yüzeyi düz değilse, kâğıdın düzgünlüğü zayıftır. Optimum yüzey düzgünlüğü, kâğıdın cinsine ve kullanım alanına göre değişir. Örneğin fotokopi çekimleri sırasında sorunlara yol açtığı için fotokopi kâğıtlarında çok yüksek yüzey düzgünlüğü değeri istenmez ancak kuşe kâğıtlarda istenir. Baskı kalitesi kâğıdın yüzey özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir. Kâğıdın yüzey özellikleri, kâğıt yüzeyine mürekkebin tutunma ve emilme sürecinde çok önemlidir. Yüzey düzgünleştikçe yeterli örtücülük için mürekkep ihtiyacı azalmakta ve baskı kalitesi ile baskı parlaklığı artmaktadır. Kâğıt yüzeyindeki gözenekler mürekkeple kâğıdın fiziksel temasını önleyecek kadar derinlikte olduğunda mürekkep bu bölgelere aktarılamaz ve homojen dağılmayan mürekkep baskı kalitesini azaltır. Kâğıt üzerindeki baskı yoğunluğu sağlanacak şekilde mürekkep film tabakası ayarlandığında mürekkep kalınlığı kâğıdın düzgün yapıda olan kısımlarında optimum baskı kalitesi için fazla gelebilir, beneklenmeye ve diğer sorunlara yol açabilir (Aydemir, 2014).

1.6. Pürüzsüzlük

Mürekkebin yüzeyi pürüzlü kâğıtlarda tamamen kurumaması zaman almakta ve bazen birkaç gün sürmektedir. Mürekkep kururken kâğıdın kararsız yapısına bağlı olarak renk değişikliği meydana gelmektedir (Özcan, 2008). Pürüzsüzlük, kâğıt yüzeyinin engebe ve topoğrafyası ile ilgilidir. Pürüzsüzlük, saniye cinsinden ifade edilen, belirli bir vakum altında belirli bir basınç altında numune yüzeyi ile cam yüzey arasındaki boşluktan belirli bir hacimdeki havanın geçmesi için gereken süreyi ifade eder. ISO 8787/Bekk & Bendtsen standardına göre pürüzlülük testi yapılır. Bentsen yönteminde pürüzlülük, 98 kPa sabit basınçta hava uygulayan Lorentzen&Wettre Bendtsen Tester ile ölçülür. Bu ölçüm metodunda kâğıt tabakası ile düz bir yüzey arasından geçen havanın hacimsel debisi ml/dk olarak ölçülür. Havanın debisi azaldıkça yüzeyin düzgünlüğü artmaktadır. Bekk Metodunda ise kâğıt tabakası ile düz yüzey arasından geçen havanın geçiş süresi saniye cinsinden ölçülür. Havanın geçiş süresinin artması yüzeyin daha düzgün olduğunu gösterir (URL-4, 2025).

1.7. Porozite

Kâğıdın porozitesi diğer bir deyişle gözenekliliği, birim zamanda, birim basınç farkı altında birim alandan geçen hava akış miktarıdır (URL-4, 2025). Porozite artıkça kâğıdın hava geçirgenliği artar. Porozite, kâğıt türüne ve kâğıdın kullanım alanına göre değişir. Baskı kâğıtlarında yüksek porozite mürekkebin kâğıda nüfuz etmesi sırasında soruna neden olduğundan baskı kalitesi olumsuz etkilendiği için düşük porozite istenir. Kâğıdın porozitesi, ISO 5636-5 standardına göre tayin edilir (Özdemir, 2021).

1.8. Emicilik

Kâğıdın emiciliği, kâğıdın mürekkep ve suyu ne kadar hızlı aldığını gösterir. Emicilik, kâğıdın üretimi sırasında kullanılan malzeme, temas süresi, tabaka boyutu, sıvı türü, sıvı sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve nemi gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Kâğıdın emicilik özelliği, kâğıt hamuruna şeffaflaştırma ajanları, yüzey kaplama maddeleri, jelatin, zambak, nişasta ve reçine gibi maddelerinin eklenmesiyle azaltılabilir. Baskı ve temizlik kâğıtları için emicilik çok önemlidir. Kâğıdın emme özelliği, özellikle kâğıdın basılması sırasında önemlidir. Hemen her baskı sistemi, kâğıdın belirli oranda boyayı emme kabiliyetinin olmasını ister (Uçar, 2010). Tuvalet kâğıdı, mendil, kâğıt havlu ve peçete gibi yumuşak ve ince kâğıttan yapılan kâğıt ürünlerin emiciliği, bu ürünlerin kalitesini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Bu kâğıt ürünlerinin su emme süreleri ve su tutma kapasiteleri sepet daldırma test yöntemi ile belirlenir. Kâğıt havlularda TS 11668, yumuşak ince kâğıt ile ürünlerinde TS EN ISO 12625-8 ve kâğıt havlularda ASTM D4431-92 standartlarına göre emicilik tayin edilir (URL-6, 2025).

1.9. Kuvvetli Yüzey

Kâğıt yüzeyinin kuvvetli olup olmaması yüzeyden lif kopma riski ile ölçülür. Yüksek hızlı baskı makinelerinde çok önemli bir özelliktir.

2. KÂĞIDIN OPTİK ÖZELLİKLERİ

Kâğıdın optik özellikleri, nasıl görüldüğünü ve yüzeyinden basılı metni okumanın ne kadar kolay olduğunu ifade eder. Optik özellikler beyazlık, parlaklık ve opaklıktır.

2.1. Beyazlık

Beyazlık, kâğıdın önemli özelliklerinden biridir. Beyazlık, bir kâğıdın görünür ışık spektrumunda yer alan tüm dalga boylarındaki ışığı yansıtma derecesidir (Duman vd., 2016). Işık kâğıda çarptığında, ışık kâğıdın lif boşluklarından geçer, lifler ve dolgu maddeleri tarafından emilir. Bir kâğıt tam beyaz ise yüksek yansıtma derecesine sahiptir ve bir ışık dalga boyunu diğerinden fazla absorbe etmez. Beyaz kâğıtların çoğunlukla yansıtma oranı %50-90 arasında olup, üç farklı dalga boyunda %20-30'a kadar düşebilmektedir (Özdemir, 2021).

Kâğıdın beyazlığını, kullanılan boyanın, dolgu maddesinin, bulamacın ve kaplamanın beyazlığı etkiler. Beyazlığı arttırmak için optik beyazlatıcılar ve çivit boya kullanılmaktadır (URL-3, 2025). Beyazlığın ölçüldüğü UV cihazının filtresinin açık ya da kapalı olmasına göre beyazlık değeri değişir. UV filtresi kapalı olduğunda beyazlık değeri 86.0 iken UV filtresi açık olduğunda 93.0'tür. Kâğıt ne beyaz ise mürekkep rengini yüzey o kadar iyi ifade eder. Yüksek beyazlığa sahip kâğıt, neredeyse tüm renkleri yansıtarak, basılı mürekkep

renginin daha parlak ve görsel efekti daha iyi olmasını sağlar. Düşük beyazlıktaki kâğıt, sadece renk ışığının bir kısmını emdiği için açık-koyu kısımların kontrastını ifade edemez ve renk dökümüne yol açar. Kâğıdın beyazlık değeri, rengin tekrarlanabilirliği, renk farkı ne kadar yakınsa renk gamının aralığı o kadar azdır. Dolayısıyla basılı ürün kalitesi o kadar iyidir (URL-3, 2025).

2.2. Parlaklık

Parlaklık, kâğıt yüzeyinin belirli bir açıda gelen ışığı yansıttığı derecedir. Genellikle 15° (dik açıdan 75°) düşük bir geliş açısındaki yansıma yüzdesine bakılarak ölçülür (URL-2, 2022). Kâğıdın parlaklığını, kâğıdın yumuşaklığı, yüzey düzgünlüğü ve kâğıdın boyutlandırma derecesi etkiler. Parlaklık, kâğıt yüzeyine basılı bir görüntünün kalitesini belirlemede ve özellikle baskı kâğıdı için çok önemlidir. Piyasadaki kâğıtlar parlaklığına göre parlak ve mat olarak sınıflandırılır. Mat veya ipek dokulu kâğıtlar, baskılı yüzeyde yüksek parlaklık oluşturarak resim ve yazı arasındaki kontrastı artırabilir. Metin baskıları ve yazı kâğıtlarında parlamayı önlemek için düşük parlaklıkta kâğıtlar tercih edilirken afişlerde yüksek parlaklık istenir (URL-6, 2018; Özdemir, 2021).

Parlaklık, Hunter ve Lehman yöntemleri ile ölçülür. Lehman yöntemi, Almanya'da kâğıt parlaklığının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılır (Özdemir, 2021). Parlaklık, gelen ışığın açısına göre değişir, açı ne kadar büyük ise kâğıt o kadar parlak olur. Parlaklık ışık açısına göre 25° , 45° ve 75° olarak belirlenir. Çoğu kâğıt için en uygun ölçüm açısı 75° olup, çok yüksek parlaklığa sahip kâğıtlar için 20° 'lik açı önerilir (URL-7, 2018).

2.3. Opaklık

Opaklık, bir kâğıt parçasının ne kadar yarı saydam veya şeffaf olduğunu ifade eder. Işık kâğıda vurduğunda ışığın bir kısmı kâğıttan geçer, bir kısmı emilir, en büyük kısmı dağılır ve geri yansıtılır. Kâğıdın opaklığı, kâğıdın yansıttığı ışık miktarının emdiği ışık miktarına oranıdır diğer bir deyişle kâğıdın ışık geçirgenliğidir. Kâğıdın ışığı emme ve yansıtma derecesi yüksek ise opaklığı da fazladır. Işığın kırılması, lif/hava ve pigment/hava gibi sınır yüzeylerinin miktarına bağlıdır (Özdemir, 2021). Hava ile lifler, dolgu maddesi, bileşik ve kaplama arasındaki saçılma daha azdır. Işığın kâğıdın içinden geçmesi zorlaştıkça mürekkebin kâğıda nüfuz etmesi güçleşir dolayısıyla baskı da zorlaşır (URL-7, 2018).

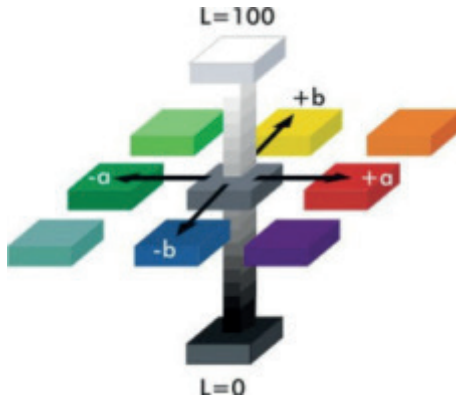
Kâğıdın opaklığını tanımlamak için kontrast oranı yaygın olarak kullanılır. Çoğu kâğıt aktarıcıdır. Arka yüzeyin ne kadar görüldüğünü gösterir. Çift taraflı baskıda, baskı kâğıtları ve zarflar için önemlidir. Özellikle düşük gramajlı kâğıtlarda ön plandadır. Kâğıdın ince olması, baskının arka yüzde görünmesini arttırdığı için opaklık yüksek olmalıdır. Aksi taktirde, baskı işlemi sırasında, basılı malzemenin ön ve arka görüntüleri birbirine karışacak, bu

durumda kaotik baskı grafikleri, basılı malzemenin kalitesinde önemli bir bozulmaya, ışık ve kusurlu ürünlere sebep olacaktır. Kâğıt opaklığı, ışığın dalga boyu, kâğıt ağırlığı, yoğunluk, boya, dolgu maddesi ve bulamaç gibi faktörlerden etkilenir. Opaklık en çok kâğıt ağırlığı ve yoğunluğu gibi nicel miktarlardan etkilenir. Kâğıdın ağırlığı ve kullanılan odun hamurunun yoğunluğu ile kâğıt kalitesi arasında güçlü bir ilişki vardır. Kâğıt miktarını arttırmak, kâğıdın opaklığını artırabilir. Örneğin temel ağırlığı 30-100 g/m² olan kâğıdın opaklığı arttırmak için ağırlığı 105 g'ı aşması gerekir (URL-7, 2018).

Bir kâğıdın opaklığı yüzde cinsinden ifade edilir. Bir kâğıt tamamen opak ise göz kâğıdın opaklığındaki küçük farklılıklara karşı daha hassas olur. Opaklıktaki %93-94 arasındaki fark, %84-85 arasındaki opaklık farkından daha belirgindir. TAPPI T425 yöntemine göre kâğıdın alt ve üst yüzeyindeki opaklık test edilir (URL-2, 2022; URL-7, 2018).

2.4. CIE

Renk Evreni Uluslararası Aydınlatma Komitesi (CIE LAB), boya, mürekkep gibi renk veren maddelerin renk eşleşmesi için evrensel bir model sağlayan renk standart sistemidir. En çok kullanılan ve temel alınan renk evrenidir. Renk evren modelleri, insan gözünün temel olarak renk ölçümü yapmaktadır. Masaüstü yayıncılıkta bilgisayarlar ve programların renk yönetim sisteminin temel renk evrenidir CIE LAB hesaplamaları, $L^*a^*b^*$ renk parametrelerine bağlı olarak yapılır. $L^*a^*b^*$ renk modeli, şekil 1 de görüldüğü gibi dikey sarı-mavi ve yeşil-kırmızı eksenlerine dayalı koordinatları kullanır. L^* aydınlık/karanlık, a^* kırmızı/yeşil ve b^* sarı/mavi değerini gösterir. $L^*a^*b^*$ renk uzayında bir renk aynı zamanda hem yeşil hem kırmızı veya hem mavi hem de sarı olamaz (Köse ve Şahinbaşkan, 2008; Özcan, 2008).



Şekil 1. CIE LAB L^* , a^* , b^* eksenleri (Özcan, 2008)

CIE LAB, standart rengin yerini teorik bir tolerans küresi çizerek belirler. Bu küre standart renkle örnekler arasında kabul edilebilir renk farkını gösterir. Renk farkı ΔE (hata payı) aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$$

ΔL^* : açıklık-koyuluk farkı, Δa^* : kırmızılık ve yeşillik farkı ve Δb^* : sarılık ve mavilik farkıdır. $\Delta L^* > 0$ ise numune standarttan daha parlak, $\Delta L^* < 0$ ise daha koyudur. Eğer $\Delta a^* > 0$ ise numune standarttan daha kırmızı, $\Delta a^* < 0$ ise daha yeşildir. $\Delta b^* > 0$ ise numune standarttan daha sarı, $\Delta b^* < 0$ ise daha mavidir (Aslan, 2010).

Tablo 2. Farklı Türde Beyaz Kağıtların $L^*a^*b^*$ Değerleri

Kâğıt Cinsi	L*	a*	b*	ΔE
Taş Kâğıt	94.6	-0.4	1	
1. Hamur	93.7	2.7	-4.1	2.9
Mat Kuşe	94.7	1.1	-4.4	1.7
Parlak Kuşe	94.4	0.5	-3.3	0.6

Renk uzayının içerisindeki iki rengin birbirinden farkının gösteren ΔE için tolerans değeri 1-6 arasındadır. $\Delta E \geq 6$ ise tolerans kutusunun dışında olan örneklerin standarttan fazla uzakta olduğunu gösterir. $\Delta E > 1$ olduğu durumu insan gözü algılayabilir. $\Delta E < 1$ olduğu zaman ise toleranslar genellikle mevcut metotlarla elde edilemezdir. Matbaacılıkta tercih edilen ΔE standardı 2-3 arasında olup, örnekler genellikle çoğu gözlemci tarafından standart renkten ayırt edilemezler (Köse ve Şahinbaşkan, 2008).

Tablo 3. ΔE farklılıkları

ΔE	
0-1	Normalde gözükmeyen farklılıklar
1-2	Çok küçük farklılıklar
2-3.5	Orta farklılıklar
3.5-5	Bariz farklılıklar
>5	Çok Bariz farklılıklar

Avrupa ve Türkiye’de kullanılan mürekkeplerin renk değerleri farklılık göstermektedir. Türkiye’deki baskıların ana renk zemin değerlerindeki değişim ISO 12647-2:2004 standardında yer alan ΔE değerleri ile uyumludur (Köse ve Şahinbaşkan, 2008).

Tablo 4. *Avrupa ve Türkiye’de Kullanılan Mürekkepler Arasındaki Renk Farkları*

Kâğıt cinsi / Baskı ana rengi	L*	a*	b*	ΔE
ISO 12647-2:2004 Kâğıt Türü 1 (Parlak Kuşe 115g/m ²)	95	0	-2	
Türkiye de Kullanılan Parlak Kuşe Kâğıtların ortalaması	94.5	1.0	-4.7	2.92
ISO 12647-2:2004 Kâğıt Türü 2 (Mat Kuşe 115 g/m ²)	94	0	-2	
Türkiye de Kullanılan Mat Kuşe Kâğıtların ortalaması	95.1	1.1	-4.4	2.86

3. NEM VE SUYA DİRENÇ ÖZELLİKLERİ

3.1. Rutubet

Kâğıdın nemi, kâğıdın bünyesinde bulundurduğu su miktarıdır ve yüzde ile verilir. Kâğıt üretiminde, elek üzerine akıtılan kâğıt hamuru %99’u içerir. Kâğıttaki nem miktarı, eleme, pressleme ve kurutma gibi ayırma süreçlerinin sonunda yaklaşık %5’e kadar düşer. Kâğıt nemi miktarı kâğıt kalitesi, kullanımı ve raf ömrü açısından önemlidir. Kâğıt hidrofilik olduğu için daha nemli bir ortama girdiğinde nem alır ve kâğıdın lifleri nemi emerek enine şişer. Tam tersi durumda, kâğıt lifleri kendi nemini bırakır su yönünün tersine çeker. Kâğıt liflerinin kolayca nem alıp-vermesi kâğıdın basılmasında ayar sorunları gibi zorluklara sebep olabilir. Bu nedenle dış ortamın nemi ile kâğıdın nemi denge olmalıdır. Eğer denge de değilse kâğıtla çevre arasında denge kuruluncaya kadar nem transferi olmaktadır. %6 nem miktarına sahip bir kâğıt paleti, %50-55’lik bağıl nemli bir ortamda dengedir; fazlası ya da düşüklüğü kalite kaybı yaşanır. Bu durum kâğıdın düz duruşunu, basılabilirlik ve işlenebilirliğine etki eden ondülasyon ve kıvrılma gibi sorunlarına neden olur. Kâğıt nemi düşük olduğunda kırılanlaşır nem fazla olunca da kâğıtta mürekkebin kurumasını geciktirerek baskı kalitesini etkiler. Baskı kâğıtlarının nem oranı ise %4-6 arasında olmalıdır (Özdemir, 2021).

Kâğıt nemi kadar kâğıdın depolanma sürecinde sahip olması gereken nem değeri de çok önemlidir. Saklama koşulundaki bağıl nem kâğıdın boyutsal stabilitesini etkiler. Kâğıt, sıcaklığı 20-22°C ve bağıl nemi %50-65 olan atmosfer koşulları altında saklanmalıdır (Özdemir, 2021; URL-4, 2025). Nemli ortamda mikroorganizmalar gelişir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada %25 neme sahip eski oluklu mukavva kâğıtlarından birer hafta aralıklarla alınan örneklerde 1 gr kâğıt örneği içerisindeki mantar kolonileri sayılmış. Başlangıçta alınan örnekte mantar kolonisi 3.000 iken 7 hafta sonra 780.000’e yükselmiştir (İmamoğlu vd., 2005). Kâğıdın nem miktarı ISO 107 standardına göre belirlenmektedir.

3.2. COBB Değeri

Kâğıdın COBB değeri, kâğıt yüzeyinin suya direnci veya suyu kabulünün bir ölçüsüdür. Belli bir süre içinde 1 m² kâğıt yüzeyi tarafından emilen suyun gr cinsinden miktarıdır. Uluslararası standartlarında etiket ve karton ürünleri için 120 sn iken ofset, fotokopi ve kuşe kâğıtlarda 60 sn'dir. Ofset baskıda mürekkep ile kullanılan su, baskı sırasında baskı kauçuğu aracılığıyla kâğıt yüzeyi temas eder. Kullanılan su kâğıt yüzeyi tarafından kontrol edilmezse baskı problemlerine neden olabilir (URL-4, 2025). COBB değeri, baskı kalitesini önemli ölçüde etkiler (Özdemir, 2021). Baskı kalitesi ve kıvrılma değerlerinin kontrolleri için COBB değeri optimum bir aralıkta olmalıdır. Optimum COBB değeri, kâğıt cinsi, gramajı ve ortam sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak değişir (URL-4, 2025). TAPPI T 441 standardına göre tayin edilir (Özdemir, 2021).

3.3. Su Yolu

Kâğıdı meydana getiren elyafların kâğıt içerisinde dizilişleri kâğıdın su yolunu oluşturur. Kâğıdın akış yönü elyafların diziliş yönü olan su yolu, makine enindeki yönü su yolu tersi olarak adlandırılır. Su ile temas sonrası kâğıtta fiziksel bozulma gözlemlenir. Kâğıdın düz durması, mukavemeti ve yırtılması gibi değişiklikler su yolu yönünde daha fazla olduğundan pilyaj, kıvrılma gibi durumlarda su yolu daha önemli hale gelir (URL-3, 2025). Kâğıdın su yönü, kâğıdın şekil değiştirme dayanımının yanı sıra kâğıdın makine içindeki hareketini de etkiler. Su yönünün uzun veya kısa kenara paralel olup olmaması basılabilirliği etkiler. Baskıda, kâğıdın su yönünün baskı silindirisinin miline paralel olduğunda, kâğıdın su yönü kâğıdın uzun kenarına paralel olmalıdır. Su yönünün uzun ya da kısa kenara paralel olup olmaması önemli olmadığı durumlarda su yönü opsiyoneldir. Kâğıt ya da kartonun baskı sonrasında ürün haline dönüştürülmesi ve kullanımı sırasındaki performansı için su yönünün doğru seçilmesi gerekir (Özdemir, 2021). Ülkemizde kâğıt ebadının ikinci sayısı su yolunu göstermektedir. Örneğin; 64x90 ebadında olan bir kâğıdın su yolu, uzunluğu 90 cm olan kenara paraleldir. Aynı şekilde 90x64 ebadındaki kâğıt için su yolu kısa kenar olan 64 cm'ye paraleldir (URL-4, 2025).

4. KİMYASAL ÖZELLİKLER

4.1. Yüzey pH Değeri

pH değeri, hidrojen derişiminin ölçüsüdür ve asidik/bazik özelliği belirler. pH metre ile ölçülür. pH değeri 1-14 arasında değişir. pH<7 ise asidik, pH>7 ise bazik, pH=7 ise nötr olduğunu gösterir. Mürekkep ile kâğıt yüzeyinin pH değerleri uyumlu olmalıdır. Kâğıdın üretildiği ortam ile mürekkebin asidik veya bazik olup olmadığı karşılaştırılmalıdır. Baskı esnasında mürekkebin çürümemesi, ton farkının olmaması, kurumada sorunla karşılaşılması için kullanılan hazne suyunun pH değerinin kontrol altında tutulması gerekir

(URL-4, 2025).

4.2. Kül İçeriği

Kül içeriği, kâğıdın yakıldıktan sonra kalan kâğıt hamurundaki inorganik kalıntılar, kâğıdın inorganik dolgu veya kaplama içeriğinin bir ölçüsüdür. Kâğıdın kül içeriği TAPPI T-413 göre belirlenir. Kül içeriğini tayin etmek için numuneler kül fırınında yakılır. Yalnızca selüloz ve kalsiyum karbonat içeren kâğıtlar için 525°C'de ateşleme, selülozu ve nemi giderir. 900°C'de ise ateşleme, kalsiyum karbonatı kalsiyum okside dönüştürecektir. Bu gibi durumlarda, eklenen kalsiyum karbonat seviyesini belirlemek için bu yöntemler birlikte kullanılabilir (URL-8, 2025).

4.3. Lignin Testi

Odunun yaklaşık %20-30'unu lignin oluşturur. Lignin, selüloz ile birlikte bulunan farklı tip bağlarla birleşmiş fenilpropandan oluşan bir biyopolimerdir. Lignin, odun hücrelerine yapısal destek, sızdırmazlık, oksidatif stres ve mikrobik saldırılara karşı direnç sağlar. Özellikle arşiv kâğıtlarında lignin varlığı kontrol edilir. Sararma direncinin de göstergesidir. Lignin miktarı, TAPPI T 222 om-88 standardına göre tayin edilir (Gülsoy, 2009).

KAYNAKLAR

- Aslan, B. (2010). Ofset baskı tekniği ile uygulanan mürekkebin kuruma esnasında renk değişimlerinin incelenmesi. Ankara: Gazi Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Çevik, B. (2016). Kâğıt ve kâğıt ürünleri sektörü. İş Bankası İktisadi Araştırmalar Bölümü Raporu, https://ekonomi.isbank.com.tr/UserFiles/pdf/sr201607_kagit-sektoru.pdf (Erişim Tarihi: 20.01. 2017).
- Çiçekler, M. (2012). Anızların (buğday sapları) kâğıt hamuru ve kâğıt üretiminde değerlendirilmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Duman, E., Akgül, A., & Özakhun, Ş. C. “Taş Kâğıt” Türünün Basılabilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi. 5. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu. İstanbul Üniversitesi- İstanbul - 04-05 Kasım / November 2016. 107-118.
- Erkan, Z. E., & Malayoğlu, U. (2001). Kâğıt-karton sanayiinde kullanılan endüstriyel hammaddeler ve özellikleri. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 118, 250-257.
- Gülsoy, S. K. (2009). Beyaz çürüklük mantarı (*Ceriporiopsis subvermispora*) ile muamele edilen *Pinus nigra* Arnold'dan NaBH₄ ilaveli biyolojik-Kraft kâğıt hamuru üretimi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi.
- İmamoğlu, S., Atik, C., Karademir, A., 2005. Atık kâğıt kullanan kâğıt-karton fabrikalarında ortaya çıkan mikrobiyolojik sorunlar. KAÜ, Artvin Orman Fakültesi Dergisi, 6(1-2): 179-190.
- Köse, E., & Şahinbaşkan, T. (2008). Renk yönetiminde kullanılan standart ICC profillerinin Türkiye’de oluşturulmuş bazı profiller ile karşılaştırılması. Politeknik Dergisi, 11(4), 365-371.
- Özcan, A. (2008). Kağıt yüzey pürüzlülüğünün L* a* b* değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(14), 53-61.
- Özdemir, F., Tutuş, A. & Dalgıç, E. (2023). Oluklu Mukavva Üretiminde Kullanılan Kâğıtlar ve Bu Kâğıtların Oluklu Levha Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması. International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches, 7(11), 144-148.
- Özdemir, L. (2021). Kâğıdın basılabilirlik terimlerinin anlamları ve kullanılışları. Avrasya Terim Dergisi, 9(3), 1-6.
- Özden, Ö. (2023). Özel kağıtlar. İstanbul: İÜC Yayınevi
- Sükan, E., Kağıt Sanayii Özel İhtisas Komisyonu (2000). Kağıt Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı
- Uçar, F. B. (2010). 19. yüzyıl endüstriyel kağıt belgelerde ayrışma ve koruma önerileri. URL-1, Kaplamalı kâğıdın özellikleri ve uygulamaları, Mart 22, 2021, <https://tr.china-paperfactory.com/>

- URL-2, Kâğıdın Fiziksel ve Optik Özelliklerinin Test Edilmesi, 28 Eylül 2022, <https://industrialphysics.com/knowledgebase/articles/>
- URL-3, Kâğıdın fiziksel ve mekanik özellikleri ve muayenesi, Mayıs 25, 2021, <https://tr.chinapaperfactory.com/>
- URL-3, Kağıt Terminolojisi. <https://www.alkimkagit.com.tr/tr/ar---ge/kagit-terminolojisi>. 3.06.2025
- URL-4, Tunç Kâğıt Mamülleri San. ve Tic. A.Ş., Kâğıdın Fiziksel Ve Optik Özellikleri, <http://www.tunckagit.com/articles/Ka%C4%9F%C4%B1d%C4%B1n%C3%96zellikleri.pdf>. Erişim tarihi: 01.06.2025
- URL-5, <http://alls-academy.com/index.php/ijanser/article/download/577/577/1136>. Erişim tarihi: 07.06.2025
- URL-6, <https://www.laboratuvar.net/tekstil-testleri/spesifik-testler/kagit-urunlerde-toplam-emicilik-tayini/> Erişim tarihi: 01.06.2025
- URL-7, Kâğıdın optik özellikleri, 10 Ekim 2018, <http://www.joyful-printing.org>
- URL-8, Kâğıdın kum ve kül içeriği, <https://www.smithers.com/industries/packaging/manufacturers-and-users/packaging-materials-testing/paper-testing-other-properties/ash-and-grit-content>. Erişim tarihi: 03.07.2025
- Yakut, A. (2012). Geri dönüştürülebilir kullanılmış kâğıttan yeni kâğıt üretiminin irdelenmesi. Tesisat Mühendisliği, 127, 68-75.



POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE NANO PARTİKÜL UYGULAMALARI

“=====”

Çiğdem ERSAN¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği
Bölümü, ORCID: 0000-0002-9149-8734

1. GİRİŞ

1.1. Polimer Matrisli Kompozitler ve Nanoteknolojiye Güncel Bakış

Polimer Matrisli Kompozitler (PMK), sürekli bir polimer fazı (matris) ile bu fazın içerisine mekanik, termal veya elektriksel özellikleri iyileştirmek amacıyla entegre edilen takviye elemanlarının (lifler, partiküller veya tabakalar) bir araya getirilmesiyle oluşturulan mühendislik malzemeleridir (Hull ve Clyne, 1996). Geleneksel PMK yapılarında takviye elemanı olarak cam, karbon veya aramid gibi makro/mikro boyutlu elyaflar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak günümüzde malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, matris fazının gelişmiş dolgu malzemeleriyle modifiye edilmesini ve özellikle nano boyuttaki yapı taşlarının sisteme dahil edilmesini zorunlu kılmıştır (Ajayan, Schadler ve Braun, 2006).

Nanoteknolojinin kompozit malzeme bilimine entegrasyonu, matris veya takviye fazına nano tozların (nanopartiküllerin) homojen bir şekilde dağıtılması esasına dayanır. Nano tozlar; yüksek spesifik yüzey alanları ve kuantum mekaniksel etkileri sayesinde, matris içerisinde çok düşük ağırlık oranlarında (genellikle %0.1 - %5 wt.) kullanılsalar dahi, matris-takviye arayüzey bağına dramatik bir şekilde güçlendirirler (Thostenson, Li ve Chou, 2005). Bu durum, geleneksel kompozitlerin mikro çatlak ilerlemesi ve delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) gibi kronik zayıflıklarının aşılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

1.2. Matris Sistemleri: Termosetler ve Termoplastikler

PMK üretiminde kullanılan polimerik matrisler, termal ve kimyasal davranışlarına göre temel olarak iki ana gruba ayrılır: Termosetler ve Termoplastikler (Campbell, 2010).

- **Termoplastikler:** Oda sıcaklığında katı halde bulunan, ısıtıldıklarında eriyerek şekil alabilen ve soğutulduklarında tekrar katılaştıran doğrusal veya dallanmış polimer zincirlerinden oluşurlar. Bu erime-donma döngüsü fiziksel bir süreç olduğundan, termoplastikler geri dönüştürülebilir bir yapıya sahiptir.

- **Termosetler:** Başlangıçta sıvı veya düşük viskoziteli reçine halinde dirler. Kimyasal bir reaksiyon (kürleme/çapraz bağlanma) neticesinde geri dönüşümsüz, üç boyutlu bir ağ yapısı oluştururlar. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra ısı karşısında erimezler ve orijinal sıvı hallerine geri döndürülemezler (Mallick, 2007).

Tarihsel süreçte havacılık, otomotiv ve savunma sanayindeki ilk yüksek performanslı PMK uygulamalarında, düşük viskoziteleri ve elyafı kolayca ıslatabilme kabiliyetleri nedeniyle cam takviyeli polyester veya epoksi gibi termoset sistemler öncülük etmiştir (Advani ve Sozer, 2012). Ancak son yıllarda,

darbe dayanımlarının yüksek olması, sınırsız raf ömürleri ve geri dönüşüm avantajları nedeniyle takviyeli ve nano toz modifiyeli termoplastik matrislerin (PEEK, PP, PA vb.) endüstriyel kullanımı da hızla artmaktadır (Friedrich, Zhang ve Schlarb, 2005).

1.3. Nano Toz ve Gelişmiş Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli nano-kompozitlerin performansını belirleyen en önemli parametre, kullanılan nano tozların (örneğin; grafen nanopartikülleri, karbon nanotüpler (CNT), nanosilika, nano-kil veya metal oksit nano tozları) polimer matris içerisinde topaklanma (aglomerasyon) yapmadan, homojen bir şekilde dağıtılmasıdır (Coleman, Khan, Blau ve Gun'ko, 2006). Nano tozların yüksek yüzey enerjisi nedeniyle kümelenme eğilimi fazladır; bu durum kompozit içerisinde gerilme yığılmalarına ve erken hasarlara yol açabilir.

Bu nedenle, kitabın ilerleyen bölümlerinde detaylandırılacak olan gelişmiş üretim yöntemleri (VARTM, Otoklav, Prepreg kalıplama vb.) incelenirken, nano tozların matrise entegrasyon süreçleri (ultrasonik karıştırma, yüksek devirli mekanik karıştırma, fonksiyonelleştirme) ve bu tozların üretim esnasındaki viskozite, akışkanlık ve kurlenme kinetiğine olan etkileri derinlemesine ele alınacaktır.

2. AÇIK KALIPLAMA YÖNTEMLERİ

Kompozit malzeme imalatında uygun kalıplama yönteminin seçilmesi; tasarlanan parçanın geometrik karmaşıklığı, elyaf sürekliliği ve hedeflenen mekanik performans ile doğrudan ilişkilidir. Matris ve takviye elemanlarının açık bir kalıp yüzeyinde bir araya getirilmesi esasına dayanan açık kalıplama yöntemleri, özellikle düşük hacimli ve büyük ölçekli yapısal parçaların üretiminde evrensel bir popülerliğe sahiptir (Strong, 2008).

Nanoteknolojinin bu proselere dahil edilmesi, genellikle matris sistemine nano toz (nanopartikül) takviyesi yapılarak gerçekleştirilir. Nano toz modifikasyonu, açık kalıplama yöntemlerinin mekanik kısıtlamalarını aşmada ve matris baskın özellikleri (tabakalar arası kayma mukavemeti, tokluk vb.) iyileştirmede kritik bir rol oynar.

2.1. El Yatırması Yöntemi ve Nano Partikül Modifikasyonu

El yatırması, kompozit endüstrisinin en köklü, esnek ve en yaygın uygulanan açık kalıplama yöntemidir. Temel prensip; kalıp yüzeyine elyaf kumaşların (keçe, dokuma kumaş vb.) yerleştirilmesi ve üzerine sıvı reçinenin (termoset) manuel olarak (fırça veya rulo yardımıyla) uygulanmasıdır.

2.1.1. Proses Adımları ve Nano Toz Entegrasyonu:

- **Kalıp Hazırlığı ve Jelkot Uygulaması:** Kalıp yüzeyine önce kalıp ayırıcı, ardından estetik ve dış ortam dayanımı sağlamak amacıyla pigment

katkılı jelkot uygulanır. Nano-kompozit uygulamalarında, jelkot içerisine eklenen nanosilika veya grafen nano tozları, jelkotun çizilme direncini, UV kararlılığını ve bariyer özelliklerini artırır (Rostami, Biros ve Al-Shammari, 2014).

- **Nano Toz Dağıtımı ve Elyaf Islatma:** Matris reçinesine (örneğin epoksi veya polyester) laminasyon öncesinde nano tozlar entegre edilir. Reçine içerisine eklenen nano tozların (karbon nanotüp, nano-kil vb.) homojen dağılması için ultrasonik prob (sonifikasyon) ve yüksek devirli mekanik karıştırıcılar kullanılır. Hazırlanan nano-modifiyeli reçine, elyaf tabakalarının üzerine dökülerek emdirilir.

- **Rulolama:** Tabakalar arasında kalan hava kabarcıklarını gidermek ve laminat kalitesini artırmak için rulolama işlemi titizlikle yapılır. Nano tozların varlığı, reçinenin viskozitesini (akışkanlığa karşı direncini) artırdığı için rulolama esnasında hava sıkışması riski yüksektir; bu nedenle proses parametreleri dikkatle optimize edilmelidir.

2.1.2. Avantajları ve Dezavantajları (Nano-Perspektif ile):

- **Avantajlar:** Düşük üretim ve kalıp maliyeti, parça boyutunda teorik bir sınır olmaması, tasarım değişikliklerine yüksek esneklik sunması. Reçinenin oda sıcaklığında kürlenebilmesi sayesinde dışarıdan bir ısı kaynağına ihtiyaç duymaması.

- **Dezavantajlar:** İş gücü yoğun bir süreç olması ve parça kalitesinin doğrudan operatör becerisine bağlı kalması. Tek yüzeyin düzgün çıkması. Nano tozların matris viskozitesini artırması nedeniyle elyafın ıslanma (wet-out) süresinin uzaması ve işlenebilirliğin zorlaşması (Yasmin ve Daniel, 2004).

2.2. Püskürtme Yöntemi ve Nano Dolgulu Sistemler

Püskürtme yöntemi, el yatırmasına kıyasla daha mekanize ve hızlı bir açık kalıp prosesidir. Bu yöntemde sürekli formdaki elyaf (fital), özel bir püskürtme tabancasına beslenerek belirli uzunluklarda (genellikle 1,3 – 2,5 cm) kırılır. Eş zamanlı olarak katalizlenmiş reçine ile kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine birlikte püskürtülür.

Püskürtme tabancaları katalizör enjeksiyon sistemlerine ve çalışma prensiplerine göre çeşitlilik gösterir. Günümüzde çevre standartlarına uyum sağlamak ve uçucu organik bileşik (VOC - stiren) emisyonunu azaltmak amacıyla havasız (basıncsız) püskürtme tabancaları tercih edilmektedir.

2.2.1. Püskürtmede Nano Partikül Kullanımı ve Viskozite Yönetimi:

Püskürtme yönteminde nano toz kullanımı, prosesin doğası gereği ciddi bir mühendislik yaklaşımı gerektirir. Matris içerisine eklenen kalsiyum karbonat veya alüminyum trihidrat gibi geleneksel mikron boyutlu dolguların

yanı sıra, fonksiyonel nano tozlar (örneğin yangın geciktirici nano-killer) reçineye ilave edilebilir (Morgan ve Wilkie, 2007).

Tiksotropi Kontrolü: Reçine kalıp yüzeyine dökme modunda değil, püskürtme modunda uygulandığı için dik yüzeylerden akma yapmaması gerekir. Reçineye eklenen fume silika (nano toz) reçineye tiksotropik özellik kazandırır; yani reçine tabancadan çıkarken düşük viskoziteli (akışkan), kalıba tutunduğunda ise yüksek viskoziteli (akıcı olmayan) davranarak akmayı önler.

2.2.2. Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajlar:** El yatırmasına göre daha hızlıdır ve işçilik giderlerini düşürür. Kompleks parça geometrilerine oldukça uygundur ve parça boyutlarında sınırlama yoktur.

- **Dezavantajlar:** Laminatın arka yüzeyinin pürüzlü kalması, mekanik özelliklerin el yatırmasına (dokuma kumaşlara) kıyasla kırılmış elyaf kullanımından dolayı daha düşük olması. Reçine sistemindeki uçucu kimyasalların (stiren vb.) açık ortamda yüksek emisyon salınımı yapması ve operatör sağlığı riski oluşturmaları.

2.3. Açık Kalıplama Yöntemlerinde Kalıp Tasarımı ve Malzemeleri

Açık kalıplama proseslerinde kalıbın performansı, nihai ürün kalitesini doğrudan belirler. Genellikle kalıp malzemesi olarak cam elyaf takviyeli plastikler (CTP) tercih edilir. Nano toz modifiyeli reçinelerin kürlenme reaksiyonları (ekzotermik reaksiyon), saf reçinelere kıyasla ısı çıkış profilinde değişiklikler gösterebilir. Nano tozlar reçinenin termal iletkenliğini artırarak kürlenme esnasında açığa çıkan ısıнын kalıp üzerinde daha homojen dağılmasını sağlayabilir; bu da kalıbın termal deformasyona uğrama riskini azaltır (Gojny, Wichmann, Fiedler ve Schulte, 2006).

2.4. Endüstriyel Uygulamalar ve Gelecek Projeksiyonu

Geleneksel olarak el yatırması ve püskürtme yöntemleri; tekne gövdeleri, otomobil ve kamyon gövde panelleri, yüzme havuzları, korozyon dayanımlı depolama tankları ve havalandırma kanallarının üretiminde baskındır.

Gelecekte bu yöntemler, düşük stiren emisyonlu yeni nano-reçine sistemlerinin geliştirilmesi ve otomasyona uygun (robotik püskürtme sistemleri) hale getirilmesi ile popüleritesini koruyacaktır. Nano tozların sağladığı ekstra mekanik güç sayesinde, daha ince kesitli ve daha hafif yapısal parçaların açık kalıplama yöntemleriyle üretilmesi mümkün hale gelmektedir.

3. PRES (KAPALI) KALIPLAMA YÖNTEMLERİ

Açık kalıplama yöntemlerinin aksine pres kalıplama teknolojileri; yüksek hacimli, seri üretime uygun, her iki yüzeyi de pürüzsüz ve boyutsal kararlılığı

yüksek olan kompozit parçaların imalatında gelinen son noktayı temsil eder. Bu proses temel olarak; ısıtılmış iki parçalı metal kalıplar (erkek ve dişi kalıp) arasına yerleştirilen kompozit imalat bileşiminin, hidrolik presler vasıtasıyla yüksek basınç (170-200 bar) ve sıcaklık (120-170°C) altında sıkıştırılarak kürleştirilmesi esasına dayanır (Kia, 1993).

3.1. SMC (Sheet Moulding Compound - Hazır Kalıplama Bileşimi) ve Nano Toz Entegrasyonu

SMC; takviye elyafları, termoset reçine, dolgu malzemeleri, kimyasal kalınlaştırıcılar, katalizörler ve kalıp ayırıcıların bir araya getirilmesiyle üretilen, rulo veya pestil halinde saklanabilen ve doğrudan kalıplanmaya hazır olan entegre bir malzemedir. Kavramsal olarak SMC, levha halindeki çeliğin kompozit malzeme teknolojisindeki tam karşılığıdır (Jutte, 1983).

Nano-Modifiyeli SMC Üretim Prosesi:

Geleneksel SMC üretiminde, sıvı ve toz girdiler (reçine, kalsiyum karbonat dolgusu vb.) mikserlerde karıştırılarak yaklaşık 40.000 - 100.000 centipoise (cP) viskozitede bir macun haline getirilir. Nanoteknolojik uygulamalarda bu aşamada matris karbon nanotüpler (CNT), grafen nanopartikülleri veya nano-kil tozları dahil edilir (Gojny ve Schulte, 2004).

- **Viskozite Bariyeri ve Dağıtım:** Nano tozların yüksek spesifik yüzey alanı, SMC macununun viskozitesini çok hızlı bir şekilde artırır. Bu durum, macunun taşıyıcı naylon/polietilen filmler üzerine serilirken ve kırılmış cam elyaflarını (genellikle %28 oranında) ıslatırken emprenye (ıslatma) sorunlarına yol açabilir. Bu bariyeri aşmak için nano tozlar sisteme dâhil edilirken özel yüzey aktif ajanlar (fonksiyonelleştirme) ve yüksek kayma gerilmeli karıştırıcılar kullanılır.

- **Olgunlaşma ve Kıvam Ayarlama:** SMC formülasyonuna eklenen magnezyum oksit (MgO) veya magnezyum hidroksit ($Mg(OH)_2$) gibi kimyasal kalınlaştırıcılar, reçinenin viskozitesini kontrollü olarak yükselterek malzemeyi ele yapışmayan bir pestil (macun) kıvamına getirir. Nano tozlar, bu kimyasal kalınlaşma kinetiğini ve ağ yapısı oluşumunu doğrudan etkilediği için olgunlaşma süresi nano-kompozit tasarımlarında hassas biçimde kalibre edilmelidir (Marker ve Ford, 1977).

3.1.1. Yapılarına Göre SMC Çeşitleri ve Nano Toz Etkileri

Kullanılan elyaf oryantasyonuna ve uzunluğuna bağlı olarak endüstride farklı SMC tipleri tanımlanmaktadır. Nano toz ilavesi, bu çeşitlerin akışkanlık davranışlarını ve anizotropik özelliklerini Tablo 1'deki gibi modifiye eder.

Tablo 3.1: SMC çeşitlerinde nano toz etkileri

SMC Tipi	Elyaf Yapısı ve Özellikleri	Nano Toz Katkısının Rolü
SMC-R (Random)	Genellikle 1,25 cm uzunluğunda, iki boyutlu düzlemde rastgele dağılmış kırılmış lifler içerir. İzotropik mekanik özellikler sunar.	Kalıplama esnasında kırılmış liflerin akış yönünde kümelenmesini önler ve matris matris arası bölgeleri güçlendirir.
SMC-C (Continuous)	Tek yönlü (unidirectional) sürekli elyaflar içerir. Elyaf doğrultusunda çok yüksek mukavemet sunar, presleme esnasında akışkanlığı yavaşır.	Sürekli elyafların taşıyamadığı enine (transvers) yönlerdeki matris baskın mekanik zayıflıkları ve tabakalar arası kayma mukavemetini (ILSS) iyileştirir (Thostenson ve Chou, 2006).
SMC-C-R	Gelişigüzel kırılmış lifler ile tek yönlü sürekli liflerin bir arada kullanıldığı hibrit sistemdir.	Farklı elyaf geometrileri arasındaki arayüzey gerilmelerini sönümler ve mikro çatlak ilerlemesini engeller.
SMC-D (Directional)	Tek yönlü fakat sürekli olmayan uzun lifler (yaklaşık 10 cm) içerir. Akış kabiliyeti SMC-C'ye göre daha iyidir.	Presleme esnasında matris ile uzun liflerin birbirinden ayrışmasını (faz ayrımı) engelleyerek homojen bir vizkozite akışı sağlar.

3.1.2. SMC Kalıplama Parametreleri ve Kalıp İçi Kaplama (IMC)

SMC pestili kalıp içerisine yerleştirildikten sonra, 120-170°C sıcaklıkta ve hidrolik basınç altında 1 ila 4 dakika arasında kürleşir.

- **Termal İletkenlik ve Hızlı Kürleşme:** Geleneksel polimerlerin termal iletkenliği düşüktür; bu durum kalın parçaların merkezinin geç kürleşmesine neden olabilir. Matrise eklenen grafen veya metal oksit nano tozları, malzemenin termal iletkenliğini artırarak kalıptan parçaya ısı geçişini hızlandırır, böylece çevrim sürelerini kısaltır (Han ve Fina, 2011).

- **Kalıp İçi Kaplama (In-Mold Coating - IMC):** Yüksek kaliteli yüzey gerektiren otomotiv dış gövde paneli gibi uygulamalarda, kürleşme bitmeden hemen önce kalıp içine yüksek basınçla özel bir kaplama enjekte edilir. Nano toz modifiyeli SMC yüzeyleri, IMC tabakası ile daha kararlı fiziksel ve kimyasal bağlar kurarak boya kalitesini (A-sınıfı yüzey) artırır.

3.1.3. Yöntemin Avantajları, Dezavantajları ve Uygulama Alanları

- **Avantajları:** Çelik ve alüminyum döküm parçalara kıyasla mükemmel maliyet/performans dengesi sunması; tek bir kalıpta birden fazla karmaşık parçanın birleştirilebilmesi (parça entegrasyonu); çok düşük işçilik maliyeti ve yüksek üretim hızı.

- **Dezavantajları:** İlk yatırım maliyetinin (ısıtılmış çelik kalıplar ve yüksek tonajlı hidrolik presler) çok yüksek olması; dolayısıyla düşük adetli üretimler için ekonomik olmaması. Nano tozların kalıp yüzeyinde yaratabileceği mikron boyutlu aşındırıcı etkiler.

- **Endüstriyel Uygulamaları:** Otomotiv sektöründe (radyatör panelleri, tamponlar, dış gövde kabukları), elektrik/elektronik sektöründe (salt kutuları, pano gövdeleri), ev aletlerinde (bulaşık makinesi iç kapakları, klima gövdeleri) ve yapı endüstrisinde (duş tekneleri ve küvetler) çok yaygın bir ticari kullanım alanına sahiptir.

3.2. BMC (Bulk Moulding Compound - Hazır Kalıplama Bileşimi)

BMC; kısa kırılmış elyaflar (genellikle 3–6 mm), termoset reçine (çoğunlukla doymamış polyester veya vinil ester), yoğun miktarda toz dolgu malzemesi (kalsiyum karbonat vb.) ve katkı maddelerinin harmanlanmasıyla elde edilen, hamur veya dökme çamur kıvamında bir hazır kalıplama bileşimidir (Meyer, 1987). SMC ile benzer kimyasal altyapıya sahip olmasına rağmen, BMC formülasyonundaki elyaf uzunluklarının çok daha kısa olması ve dolgu oranının yüksekliği, bu malzemeyi karmaşık enjeksiyon ve pres kalıplama prosesleri için benzersiz kılar.

3.2.1. BMC Reolojisi ve Nano Toz Modifikasyonu:

Geleneksel BMC prosesinde sıvı reçine, katalizörler ve mikron boyutlu endüstriyel dolgular (kalsiyum karbonat, alüminyum trihidrat) “Z-biçimli” bıçaklara sahip yatay karıştırıcılarda yoğrularak homojen bir çamur haline getirilir. Nanoteknolojik modifikasyonlarda, bu yoğurma aşamasından önce reçine fazına nanosilika, alümina nano tozları veya fonksiyonelleştirilmiş grafen entegre edilir (Wetzel, Hauptert ve Zhang, 2006).

- **Viskozite ve Topaklanma Kontrolü:** BMC zaten mikron boyutlu dolgular nedeniyle oldukça yüksek viskoziteli ve yoğun bir yapıya sahiptir. Reçine sistemine eklenen nano tozların yüksek yüzey enerjisi, sistemdeki serbest reçine miktarını azaltarak hamurun aşırı kuru olmasına yol açabilir. Kalıp içerisinde homojen bir akış sağlamak ve elyafların matristen ayrışmasını (faz ayrılması) önlerken, nano tozların da kümelenmesini engellemek için karıştırma torku ve sıcaklığı hassas kontrol edilmelidir.

- **Boyutsal Kararlılık ve Aşınma Direnci:** BMC, düşük çekme katkılarıyla üretilse de kürleşme esnasında mikron düzeyinde hacimsel değişimler gösterebilir. Reçine matrisine entegre edilen nano-killer (montmorillonit vb.), kürlenme büzülmesini minimuma indirerek parçanın boyutsal kararlılığını mükemmelleştirir ve yüksek sıcaklıktaki presleme esnasında mikro çatlak oluşumunu baskılar (Hussain, Nakahira ve Niihara, 2006).

3.2.2. BMC Avantajları, Dezavantajları ve Uygulamaları:

- **Avantajları:** Karmaşık geometrilere, kalın kesit varyasyonlarına ve ince detaylara (vida yuvaları, federler) sahip parçaların kalıplanmasında mükemmeldir. Hem pres kalıplamaya (sıkıştırma) hem de transfer/enjeksiyon kalıplamaya çok uygundur. Elektriksel yalıtkanlığı ve ark dayanımı son derece yüksektir.

- **Dezavantajları:** Elyaf boylarının kısa olması (3–6 mm) nedeniyle yapısal/mekanik mukavemeti (özellikle darbe ve çekme dayanımı) SMC'ye ve sürekli elyaf içeren yöntemlere göre oldukça düşüktür. Nano tozların varlığı, çamurun kalıp içindeki aşındırıcılığını artırabilir.

- **Uygulama Alanları:** Elektrikli ev aletleri (ütü tabanları, tost makinesi yan panelleri, devre kesici gövdeleri), otomotiv sektöründe far reflektörleri (yüksek yüzey pürüzsüzlüğü gerektiren bölgeler), valf kapakları ve elektrik dağıtım panoları.

3.3. Islak Sistemli Preform ve Keçeleri Presleme

Bu yöntem; karmaşık geometrilili ve yüksek mekanik dayanım gerektiren CTP (Cam Elyaf Takviyeli Plastik) ürünlerin orta ve yüksek hacimli imalatında kullanılan, açık ve kapalı kalıplama ilkelerini melezleyen bir presleme teknolojisidir. Proses; kırılmış elyafların veya özel keçe formlarının (preform) kalıp geometrisine uygun olarak önceden şekillendirilmesi ve ardından üzerine ıslak reçine karışımı dökülerek preslenmesi esasına dayanır (Rudd, 1997).

3.3.1. Proses Adımları ve Nano Toz Dağıtımı:

a) **Preform Hazırlığı:** Cam elyaf fitilleri kırılarak döner bir elek veya emişli kalıp üzerine püskürtülür ve bir bağlayıcı (binder) yardımıyla parçanın kaba geometrisine sahip bir “elyaf ön şekli (preform)” oluşturulur.

b) **Reçine Dağıtımı ve Nano Toz Vurgusu:** Isıtılmış metal dişi kalıp içerisine preform yerleştirilir. Üzerine katalizlenmiş ve nano tozlar ile modifiye edilmiş (örneğin yangın geciktirici nano-antimon trioksit veya elektriksel iletkenlik için karbon nanotüp içeren) sıvı reçine dökülür. Burada nano tozların homojen dağılımı, pres kapandığında hidrolik basınçla (170–200 bar) hareket eden reçinenin, yoğun elyaf gözenekleri arasından geçerken elyaflar tarafından “filtrelenmesini” (filtration effect) önlemek açısından hayati önem taşır (Diallo, Morgan ve Wilkie, 2015). Nano tozlar elyaflara takılırsa, parçanın merkezinde nano tozca fakir, zayıf bölgeler oluşur.

c) **Presleme ve Kürleşme:** Erkek kalıp hızla kapanarak reçineyi tüm preform yapısına emdirir. Reçine, kalıp sıcaklığı (120–170°C) altında sertleşene kadar basınç altında tutulur.

3.3.2. Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajları:** Elyaf yönlenmesi ve yoğunluğu parça üzerinde kontrol edilebildiği için BMC'ye kıyasla çok daha yüksek mekanik mukavemet ve darbe dayanımı sunar. Büyük ölçekli ve derinliği fazla olan derin kaplar, kutular veya yapısal paneller için idealdir.

- **Dezavantajları:** Preform hazırlama aşaması ek bir ekipman ve zaman (işçilik/otomasyon) gerektirir. Kalıp maliyetleri yüksektir. Nano-modifiyeli reçinelerin viskozite artışı, pres kapanma hızı ile reçine akış hızı arasında hassas bir senkronizasyon gerektirir.

3.4. Termoplastik Matrisli Hazır Kalıplama Levhalarının Preslenmesi (GMT - Glass Mat Thermoplastics)

GMT, özellikle otomotiv endüstrisinde yüksek darbe dayanımı ve hızlı çevrim süreleri nedeniyle tercih edilen, yarı mamul formundaki takviyeli termoplastik levhaların sıcak presleme yöntemiyle şekillendirilmesi esasına dayanır. Geleneksel SMC and BMC sistemlerinden en büyük farkı, matris olarak reaktif bir termoset reçine yerine; polipropilen (PP), poliamid (PA) veya polikarbonat (PC) gibi yüksek moleküler ağırlıklı termoplastik polimerlerin kullanılmasıdır (Karger-Kocsis, 1997).

3.4.1. Proses Mekanizması ve Termal Çevrim:

GMT prosesi kesikli (batch) bir termal döngüye dayanır. Katı haldeki hazır GMT levhaları, kalıp dışındaki özel kızılötesi (IR) fırınlarda matris polimerinin erime sıcaklığının (PP için ~200-220°C) üzerine kadar ısıtılır. Tamamen yumuşayan ve eriyen levhalar, hızla oda sıcaklığına yakın veya hafifçe ısıtılmış (60-80°C) hidrolik pres kalıbına transfer edilir. Pres hızla kapanarak (hızlı kapama hızı: 800-1000 mm/s) malzemeyi kalıp boşluğuna dağıtır ve polimer soğuyarak katılaşıp kadar basınç altında tutulur (Louie, Kolarik ve Advani, 1995).

3.4.2. GMT Sistemlerinde Nano Toz Vurgusu ve Reolojik Zorluklar:

Termoplastik matrislerin erimiş haldeki viskoziteleri, termoset reçinelerin (kürleşme öncesi) sıvı hallerine kıyasla mertebelerce daha yüksektir. Bu yüksek başlangıç viskozitesine bir de nano tozların (örneğin karbon nanotüpler, organo-killer veya grafen nano-tabakaları) eklenmesi, eriyik reolojisini oldukça karmaşık hale getirir (Sinha Ray ve Okamoto, 2003).

- **Eriyik Mukavemeti ve Akış Kararlılığı:** Nano tozlar, erimiş termoplastik zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayarak malzemenin eriyik mukavemetini (melt strength) artırır. Isıtılan GMT levhası fırından kalıba taşınırken sarkma (sagging) yapmaz. Ancak kalıp kapandığında, yüksek viskozite nedeniyle matrisin elyaf gözenekleri arasından süzülerek uç noktalara akması zorlaşır. Bu durum, nano tozların matris içinde aglomerasyon (topaklanma) yapmadan son derece homojen dağıtılmasını ve pres basıncının optimize edilmesini zorunlu kılar.

- **Kristallenme Kinetiği (Nükleer Ajan Etkisi):** Termoplastiklerin kalıpta soğuma esnasındaki kristallenme derecesi parça mukavemetini doğrudan etkiler. Sisteme entegre edilen nano tozlar, mükemmel birer nükleer ajan

(çekirdeklendirici) görevi görür. Polimer eriyiğinin daha yüksek sıcaklıklarda ve daha kısa sürede kristallenmesini sağlayarak kalıpta kalma (soğuma) süresini dramatik biçimde düşürür ve endüstriyel çevrim verimliliğini maksimuma çıkarır (Advani, 2007).

3.4.3. GMT Avantajları, Dezavantajları ve Uygulamaları:

• Avantajları:

- Çok yüksek darbe dayanımı ve tokluk (tokluk değeri termoset SMC sistemlerine kıyasla belirgin şekilde yüksektir).
- Saniyelerle ifade edilen (genellikle <60 saniye) çok hızlı üretim çevrimi.
- Sınırsız raf ömür (termosetler gibi soğuk zincir depolama gerektirmez).
- %100 geri dönüştürülebilirlik (hurda parçalar yeniden eritilerek enjeksiyon veya ekstrüzyon proseslerinde değerlendirilebilir).

• Dezavantajları:

- Hammadde ve levha üretim maliyetlerinin yüksek olması.
- Kalıp dışı fırınlama ve robotik transfer otomasyonu gereksinimi nedeniyle yüksek ilk yatırım maliyeti.
- Yüksek viskozite sebebiyle yüzey kalitesinin (A-sınıfı otomotiv dış yüzeyleri için) termoset SMC kadar pürüzsüz olmaması.

• **Endüstriyel Uygulama Alanları:** Otomotiv alt taban koruma paneleri, tampon taşıyıcı kirişleri, koltuk iskeletleri, stepne yuvaları, akü taşıyıcı tablaları ve yapısal panel sistemleri.

4. SIVI KALIPLAMA ve YÜKSEK PERFORMANSLI VE SÜREKLİ İMALAT YÖNTEMLERİ

Sıvı Kompozit Kalıplama (Liquid Composite Molding - LCM) teknolojileri, kuru elyaf preformlarının kapalı bir kalıp boşluğuna yerleştirilmesi ve ardından sıvı reçinenin basınç veya vakum gradyanı kullanılarak bu boşluğa enjekte edilmesi esasına dayanır. Bu gruptaki yöntemler, havacılık ve rüzgâr enerjisi gibi yüksek performans ve yapısal bütünlük gerektiren sektörlerin omurgasını oluşturur (Parnas, 2000).

Nanoteknolojinin bu yöntemlere entegrasyonu, nano tozların sıvı matris içerisindeki taşınım dinamikleri ve elyaf gözenekleri arasındaki filtrasyon (süzülme) davranışları nedeniyle özel bir reolojik yaklaşım gerektirir.

4.1. RRIM (Reinforced Reaction Injection Molding - Takviyeli Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama)

RRIM, geleneksel RTM veya pres yöntemlerinden farklı olarak, düşük moleküler ağırlıklı ve son derece akışkan iki veya daha fazla reaktif sıvı bileşenin (genellikle poliüretan bazlı izosiyanat ve poliol) yüksek basınç altında bir karıştırma odasında çarpıştırılarak kalıp içine hızla enjekte edilmesi esasına dayanan bir hacimsel imalat teknolojisidir. Prosesin en özgün yanı, polimerizasyon (kürleşme) reaksiyonunun doğrudan kalıp boşluğunun içinde, saniyeler içinde gerçekleşmesidir (Macosko, 1989).

4.1.1. Proses Mekanizması ve Reaktif Karışım Dinamikleri:

Sistemde sıvı bileşenler yüksek basınçlı pompalar vasıtasıyla (yaklaşık 100–200 bar) ortak bir enjeksiyon kafasına (mixhead) sevk edilir. Kafanın içindeki dar odacıkta hidrolik olarak çarpışan bileşenler, moleküler düzeyde karışarak sıvı halde kalıba akar. Kalıp dolduğu anda reaksiyon hızla tamamlanır ve parça katılır. Geleneksel RIM yönteminden farklı olarak RRIM’de, bu sıvı bileşenlerden birinin (genellikle poliol fazının) içerisine kırılmış cam lifleri, volastonit veya mika gibi takviye elemanları mikron boyutunda önceden harmanlanır.

4.1.2. RRIM Sistemlerinde Nano Toz Vurgusu ve Karıştırma Kafası Kritikliği:

RRIM prosesi, saniyelik reaksiyon süreleri ve çok yüksek sıvı hızları (high shear) ile çalıştığı için nanoteknolojik modifikasyonlar bu yöntemde hem büyük bir avantaj hem de mekanik bir meydan okuma yaratır:

- **Çarpışmalı Karıştırma Esnekliği (Impingement Mixing):** Nano tozların (örneğin grafen nano-tabakaları, nanosilika veya fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüpler) RRIM prosesine dahil edilmesi, genellikle sıvı poliol tankında gerçekleştirilir. Yüksek yüzey enerjisine sahip nano tozlar sıvı tankında karıştırıldıktan sonra, enjeksiyon kafasındaki yüksek basınçlı çarpışma (impingement) esnasında ortaya çıkan muazzam kayma gerilmeleri (shear forces) sayesinde matris içinde sekonder bir dağılım (de-agglomeration) sürecine uğrar (Becker, 2012). Yani RRIM prosesinin kendi dinamikleri, nano tozların topaklanmalarını parçalamada doğal bir avantaj sağlar.

- **Aşınma ve Viskozite Kısıtlamaları:** Nano tozların poliolün viskozitesini artırması, enjeksiyon kafasındaki hassas nozulların basınç dengesini bozabilir. Ayrıca, sert seramik veya metal oksit nano tozları, yüksek hızlarda hareket ederken karıştırma kafasının cidarında ve nozullarda mikron düzeyinde aşındırıcı (abrasive) etki yaratarak ekipman ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle nano toz oranları ve nozul geometrileri dikkatle kalibre edilmelidir (Karger-Kocsis, 1994).

- **Boyutsal Kararlılık ve Hücresel Yapı Modifikasyonu:** Poliüretan bazlı RRIM parçaları genellikle mikro-hücreli (köpük) bir iç yapıya sahiptir. Sisteme eklenen nano-killer veya nano-grafen tozları, köpürme esnasında gaz kabarcıklarının büyümesini kontrol eden birer çekirdeklendirici (nucleating agent) gibi davranarak daha homojen ve ince hücreli bir iç yapı elde edilmesini sağlar. Bu durum, parçanın darbe enerjisi sönmeme kabiliyetini ve termal genişleme katsayısının (CLTE) kararlılığını doğrudan artırır (Yuan ve Misra, 2006).

4.1.3. Yöntemin Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajları:** * Çok hızlı çevrim süreleri (genellikle 30-90 saniye arasında kalıptan çıkarma).

- a. Düşük kalıp içi basınçlar (enjeksiyon yüksek basınçla başlasa da kalıp içi basınç reaksiyon esnasında düşüktür), bu sayede RTM'e kıyasla daha hafif ve ekonomik kalıplar kullanılabilir.

- b. Büyük ölçekli ve entegre esnek/yarı-rijit parçaların (örneğin otomotiv çamurlukları, gövde panelleri) üretimine mükemmel uyum sağlaması.

- **Dezavantajları:**

- a. Kullanılan takviye elyaflarının boyunun kısa olması nedeniyle, uzun elyafli otoklav veya RTM parçaları kadar yüksek yapısal mekanik mukavemet sunamaması.

- b. Kimyasal bileşenlerin nem hassasiyetinin yüksek olması ve ham-madde depolama maliyetleri.

4.1.4. Endüstriyel Uygulama Alanları:

Otomotiv endüstrisinde esnek tampon pofilleri, çamurluklar, yan marşpiyeller, iç mekân panel kaplamaları ve ağır vasıta dış gövde elemanları RRIM yönteminin başlıca ticari uygulama alanlarıdır.

4.2. RTM (Resin Transfer Moulding - Reçine Transfer Kalıplama)

RTM; iki parçalı, rijit (genellikle metal veya kompozit) eşleşen kapalı kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen bir enjeksiyon prosesidir. Kuru elyaf pre-formu kalıba yerleştirilip kalıp sıkıca kapatıldıktan sonra, düşük viskoziteli termoset reçine (epoksi, polyester veya vinil ester) kalıp içine pozitif basınçla (genellikle 1-6 bar) enjekte edilir (Rudd ve ark., 1997).

4.2.1. RTM Prosesinde Nano Toz Entegrasyonu ve Filtrasyon Etkisi:

RTM prosesinde yüksek kaliteli parça eldesi için enjekte edilen reçinenin viskozitesinin düşük olması (genellikle <500 cP) assumes edilir. Reçine sisteminde karbon nanotüpler (CNT), grafen nano-tabakaları veya alümina nano tozları eklendiğinde proses şu dinamiklerden etkilenir:

- **Partikül Süzülme (Filtrating) Olgusu:** RTM enjeksiyonu esnasında, sıkıştırılmış kuru elyaf tabakaları mikron boyutunda gözeneklere sahip gözenekli bir ortam (porous medium) oluşturur. Eğer reçine içindeki nano tozlar aglomerasyon (kümelenme) yapmışsa veya parçacık boyutu elyaf boşluklarına göre büyükse, elyaf dokusu bir “filtre” gibi davranır (Erdal, Sonmez ve Coulon, 2007). Enjeksiyon girişine yakın bölgelerde nano toz birikirken, kalıbın çıkışına yakın bölgeler saf reçineyle dolar. Bu durum parça genelinde gradyanlı ve heterojen mekanik özelliklere yol açar. Bu riski önlemek için nano tozların fonksiyonelleştirilmesi ve Darcy Kanunu bazlı akış simülasyonlarında partikül taşınım denklemlerinin optimize edilmesi şarttır.

- **Kürleşme Ekzotermi Kontrolü:** RTM parça kalınlıkları yüksek olabilmektedir. Reçineye eklenen karbon bazlı nano tozlar, sistemin termal iletkenliğini artırarak kalıp içi kürleşme esnasında oluşan tepe ekzoterm sıcaklığını dengeler, böylece termal gerilmeleri ve parça içi çarpılmaları (warp) azaltır (Kim, Park, Okoli ve Zhang, 2009).

4.2.2. Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajları:** Her iki yüzeyi de pürüzsüz, boyutsal toleransları mükemmel parçalar üretilir. Elyaf hacim oranı (V_f) %60 seviyelerine çıkabildiği için yüksek mekanik performans elde edilir. Otomasyona uygundur ve stiren/VOC emisyonu minimumdur.

- **Dezavantajları:** Büyük parçalar için kalıp maliyetleri astronomiktir. Kalıp tasarımında hava sıkışmasını önlemek için enjeksiyon ve çıkış (vent) noktalarının tasarımı karmaşıktır.

4.3. VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding - Vakum Yardımlı RTM / Vakum İnfüzyon)

VARTM veya endüstrideki adıyla Vakum İnfüzyon yöntemi, RTM'in yüksek kalıp maliyeti kısıtlamasını ortadan kaldıran, tek taraflı rijit bir kalıp ve bir esnek vakum torbası (torbalama filmi) kullanan modifiye edilmiş bir LCM prosesidir (Seemann, 1990). Reçinenin kalıp içine emilmesi, pozitif bir pompa basıncıyla değil, kalıp içi ile atmosfer basıncı arasında yaratılan negatif vakum gradyanı (ΔP) sayesinde gerçekleşir.

4.3.1. Reçine Dağıtım Ağı ve Akış Esnekliği:

VARTM prosesinde reçinenin büyük yüzeylere hızla yayılabilmesi için elyaf preformunun üzerine yüksek geçirgenliğe (permeability) sahip bir reçine dağıtım filesi (distribution media) yerleştirilir. Reçine bu file üzerinde hızla ilerler (3 boyutlu akıştan ziyade 2.5 boyutlu akış) ve ardından elyaf tabakalarının kalınlığı boyunca (Z-ekseninde) aşağı doğru emilir.

4.3.2. VARTM Sistemlerinde Nano Toz:

VARTM prosesinde itici güç sadece vakum (ΔP) ile sınırlı olduğundan, reçine akış hızı RTM'e göre oldukça düşüktür. Bu durum nano-kompozit üretiminde hem avantaj hem de dezavantaj yaratır:

- **Viskozite Yönetimi:** Sadece vakum gücü kullanıldığı için, reçine viskozitesindeki en ufak bir artış infüzyon süresini (filling time) aşırı uzatabilir. Matrise eklenen nano tozların viskoziteyi artırıcı etkisi, infüzyonun yarıda kalmasına (kuru bölge oluşumu / dry spots) neden olabilir. Bu nedenle VARTM için nano toz oranları genellikle %0.5 wt. seviyesinin altında tutulur veya düşük viskoziteli özel infüzyon epoksileri seçilir (Fan, Santare ve Advani, 2008).

- **Mikro Yapısal Gözeneklilik (Porosity) Azaltımı:** Vakum infüzyonunda yüksek basınç uygulanmadığı için parça içinde mikro boşluk (void) kalma eğilimi vardır. Reçineye homojen dağıtılmış nanosilika veya nano-kil tozları, elyaf-matris arayüzeyindeki mikro boşlukları doldurarak delaminasyon direncini ve sıkıştırma sonrası darbe (CAI) dayanımını önemli ölçüde artırır (Zhou, Jeelani ve Lacy, 2013).

4.3.3. Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajları:** Çok büyük ölçekli parçalar (örneğin 80 metrelik rüzgâr türbini kanatları, gemi gövdeleri) son derece düşük kalıp maliyetleriyle üretilir. Sadece tek taraflı rijit kalıp yeterlidir.

- **Dezavantajları:** Sadece tek yüzey pürüzsüz çıkar, parça kalınlık homojenliği vakum torbasının baskısına bağlı olarak hafif değişkenlik gösterebilir. Çevrim süresi RTM'e göre daha uzundur.

4.4. Otoklav Kalıplama Yöntemi (Autoclave Molding)

Otoklav kalıplama; havacılık, uzay ve savunma sanayisinde birincil yük taşıyıcı yapısal parçaların imalatında kullanılan, kompozit malzeme kalitesinin en üst düzeyde olduğu endüstriyel standarttır. Yöntem temel olarak; önceden reçine emdirilmiş elyaf tabakalarının (prepreg) kalıp üzerine serilmesi, torbalanması ve ardından sıcaklık ile kontrollü azot gazı basıncının eş zamanlı uygulandığı bir basınçlı kap (otoklav) içerisinde kürleştirilmesi esasına dayanır (Campbell, 2004).

4.4.1. Otoklavda Vakum Torbalama Bileşenleri:

Otoklav içerisine giren laminat, çok tabakalı özel bir torbalama mimarisine sahiptir. Kalıptan dışarıya doğru sırasıyla şu elemanlar yer alır: Kalıp ayırıcı, prepreg laminat, delikli ayırıcı film (peel ply), emici/dağıtıcı keçe (breather/bleeder) and en dışta tüm sistemi sızdırmaz şekilde kapatan esnek vakum torbası.

4.4.2. Prepreg Teknolojisi ve Nano Toz / Nano Yaprak Modifikasyonu:

Otoklav kalıplamada ham girdi genellikle hazır prepreglerdir. Nano-modifiye otoklav imalatlarında iki temel yaklaşım öne çıkar: Reçine fazına nano toz enjeksiyonu veya tabakalar arasına grafen nano yaprakları/karbon nanotüplerin (CNT) entegre edilmesi (Sihn, Kim, Kawabe ve Tsai, 2008).

- **Sıkıştırma Basıncı ve Reoloji İlişkisi:** Otoklavda uygulanan yüksek dış basınç (genellikle 3–7 bar), tabakalar arasındaki mikro boşlukları (void) tamamen ezerek elyaf hacim oranını (V_f) %65–70 seviyelerine kadar çıkarır. Reçineye eklenen nano tozlar, kürleşme döngüsünün başındaki minimum viskozite noktasını (gel point öncesi akışkanlık fazı) yukarı çeker. Bu durum, reçinenin emici keçeye (bleeder) aşırı süzülmesini önlerken, yüksek basınç altında nano tozların tabakalar arasında homojen kalmasını ve faz ayrımı yapmamasını zorunlu kılar.

- **Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu (Interlaminar Fracture Toughness):** Otoklav parçalarının en kritik zayıflığı, tabakalar arası darbe eğilimidir. Matris matris arayüzüne yerleşen nano-grafen veya fonksiyonelleştirilmiş nano tozlar, Mode-I ve Mode-II kırılma tokluğunu belirgin şekilde artırarak havacılık parçalarında delaminasyon (tabaka ayrılması) direncini en üst düzeye çıkarır (Rafiee ve ark., 2009).

4.4.3. Yöntemin Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajları:** Boşluk (void) oranının %1'in altında olması, olağanüstü yüksek ve tekrarlanabilir mekanik özellikler, çok büyük ve karmaşık havacılık parçalarının (uçak kanat ve gövde panelleri) tek parça halinde üretilmesi.

- **Dezavantajları:** Otoklav cihazının ve sarf malzemelerinin (vakum torbaları vb.) çok yüksek maliyetli olması, enerji tüketiminin fazlalığı ve çevrim sürelerinin saatler sürmesi.

4.5. Pultrüzyon Yöntemi (Pultrusion)

Pultrüzyon; sabit kesitli, sürekli profil (boru, I-kiriş, çubuk, levha) imalatında kullanılan, kompozit endüstrisinin en verimli ve kesintisiz (sürekli) otomasyon prosesidir. Metal şekillendirmedeki ekstrüzyon yönteminin çekme esasına dayalı kompozit karşılığıdır (Starr, 2000).

4.5.1. Proses Akış Şeması:

Sürekli formdaki elyaf fitilleri (roving) ve keçeler, kılavuzlardan geçerek bir sıvı reçine banyosuna dairesel akışla girer. Burada tamamen reçineye doyurulan lifler, parçanın nihai geometrisini belirleyen sabit kesitli, ısıtılmış metal bir kalıptan geçirilerek çekilir. Isıtılmış kalıp içinde hızla kürleşen profil, kalıptan katılaşmış olarak çıkar ve sürekli çekici mekanizma tarafından çekilerek hareketli bir testere ile istenen boylarda kesilir.

4.5.2. Pultrüzyonda Nano Toz Katkısı ve Kalıp İçi Dinamikler:

Pultrüzyon banyosuna ve reçine formülasyonuna nanosilika, nano-kil veya karbon karası nano tozlarının eklenmesi, sürekli çekme prosesinde hem mekanik hem de tribolojik kararlar gerektirir (Roux, Eguiazabal ve Nazabal, 2016):

- **Kalıp İçi Sürtünme ve Çekme Kuvveti (Pulling Force):** Pultrüzyonda en kritik parametre, malzemenin ısıtılmış kalıptan geçerken oluşturduğu sürtünme direncidir. Reçineye eklenen nano tozlar viskoziteyi artırdığı gibi, kalıp cidarlarında sürtünme katsayısını da yükseltebilir. Bu durum, çekici ünitenin kaymasına veya liflerin kalıp içinde kopmasına (jamming) neden olabilir. Bunu önlemek için nano toz içeren formülasyonlarda özel iç kalıp ayırıcılar kullanılmalı ve nano toz boyutu mikron altı seviyede tamamen dağıtılmalıdır.

- **Çekme Yönü Dışı (Enine) Mekanik İyileşme:** Pultrüzyon ürünleri elyaf yönünde (boylamasına) mükemmel mukavemete sahiptir ancak enine (transverse) doğrultuda zayıftır. Matrise dağıtılan nano tozlar, izotropik bir takviye etkisi yaratarak profilin enine yönlerdeki çekme ve eğilme mukavemetini iyileştirir, cıvata deliklerindeki gerilme yığılmalarına karşı direnç sağlar (Vedernikov ve ark., 2020).

4.5.3. Yöntemin Avantajları ve Dezavantajları:

- **Avantajları:** Tamamen otomatik, kesintisiz ve çok hızlı bir üretim yöntemi olması; işçilik maliyetlerinin minimumluğu, malzeme firesinin neredeyse hiç olmaması, elyaf hacim oranının yüksekliği.

- **Dezavantajları:** Yalnızca sabit kesitli profillerin üretilebilmesi (kesit boyunca geometri değişmez), kalıp ve kurulum maliyetlerinin yüksek olması, başlangıç kılavuz diziliminin zaman alması.

4.6. Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding)

Filament sarma; özellikle silindirik, küresel veya simetrik içi boş kompozit yapıların (basınçlı tanklar, borular, roket motoru kovanları) imalatında kullanılan yüksek otomasyonlu bir sürekli üretim yöntemidir. Proses; sürekli elyaf fitillerinin (roving) bir reçine banyosundan geçirilerek ıslatılması ve ardından belirli bir sarma açısıyla dönen bir mandrel (malafa) üzerine gerginlikle sarılması esasına dayanır (Peters, 2013).

4.6.1. Nano Toz Entegrasyonu ve Merkezkaç Kuvveti Etkisi:

Filament sarma prosesinde, reçine banyosuna entegre edilen karbon nanotüpler (CNT) veya grafen nanopartikülleri gibi nano tozlar, doğrudan liflerin arayüzeylerine taşınır.

- **Sarma Gerginliği ve Reoloji Dengesi:** Nano tozların reçine banyosunun viskozitesini artırması, liflerin banyodan geçerken maruz kaldığı sürtünmeyi ve dolayısıyla elyaf üzerindeki lokal gerilmeyi artırabilir. Sarma esnasında elyaf gerginliği (tension), matrisin elyaf demeti içerisine nüfuz etmesini sağlar. Viskozite yüksek olduğunda, liflerin iç kısımları nano tozlu reçineyle yeterince ıslanmayabilir (Cohen, 1997). Bu nedenle banyo sıcaklığı ve reoloji kontrolü kritik önemdedir.

- **Hidrostatik Basınç ve Boşluk Azaltımı:** Üst üste sarılan tabakaların yarattığı radyal baskı, iç tabakalardaki havanın dışarı atılmasını sağlar. Matriste yer alan nanosilika tozları, bu sıkışma esnasında mikro-boşlukları (void) bloke ederek yüksek basınçlı tanklarda gaz sızdırmazlığını (permeability) ve mikromekanik kilitlenmeyi artırır (Sun, Boo, Browning, Sue ve Clearfield, 2009).

4.7. Savurma (Santrifüj) Döküm Yöntemi (Centrifugal Casting)

Savurma döküm yöntemi; silindirik gövdeli boru ve tankların üretiminde kullanılan, kalıbın dönme hareketiyle oluşan merkezkaç kuvvetinden yararlanan bir açık/kapalı imalat prosesidir. Dönmekte olan bir silindirik kalıbın iç yüzeyine elyaf takviyeleri yerleştirilir ve reçine besleme borusu vasıtasıyla sıvı matris enjekte edilir. Merkezkaç kuvveti, reçineyi elyafların arasına doğru dış çapa doğru hızla iter (Gibson, 1994).

4.7.1. Proses Dinamikleri ve Nano Toz Çökelme (Segregasyon) Riski:

Savurma döküm prosesinde nanoteknolojik katkıların kullanımı reolojik açıdan en riskli yöntemlerden biridir.

- **Yoğunluk Farkı ve Gradyanlı Yapı (Segregasyon):** Kalıbın çok yüksek devirlerde dönmesi nedeniyle oluşan yüksek G-kuvveti, matris içerisindeki bileşenleri yoğunluklarına göre ayırıştırma eğilimindedir. Eğer kullanılan nano tozların (örneğin metal oksit veya seramik nano tozları) yoğunluğu polimer matrise göre çok yüksekse, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle bu tozlar kalıbın en dış çeperine doğru savrulur (Lajvardi, Sharifshahraki ve Shokrieh, 2015). Bu durum, parça kesiti boyunca heterojen bir nano toz dağılımına (gradyanlı kompozit) yol açar. Bu durum avantaja dönüştürülerek aşınmaya dayanıklı dış cidar elde edilebileceği gibi, homojenlik istendiğinde aglomerasyonu önleyici kimyasal fonksiyonelleştirme hayati önem taşır.

5. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI

Ders notlarınızda yer alan genel matris kıyaslaması ve üretim yöntemlerinin karakteristik özellikleri temel alınarak, nano toz eklenebilirliği ve reolojik duyarlılık parametreleri de eklenerek hazırlanan geniş özet tablosu Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Üretim yöntemlerinin karakteristik özelliklerine göre nano toz eklenebilirliği

Üretim Yöntemi	Elyaf Formu / Boyu	Üretim Hızı / Hacmi	Kalıp Maliyeti	Parça Boyut / Geometri Sınırı	Nano Toz / Nanoteknoloji Entegrasyon Hassasiyeti
El Yatırması	Dokuma ku- maş, keçe (Sü- rekli/Uzun)	Düşük hız / Düşük hacim	Çok Dü- şük	Sınır yok, sadece tek yüzey düz- gün	Düşük: Manuel vizko- zite kontrolü zordur, hava kabarcığı riski yüksektir.
Püskürtme	Kırpılmış elyaf (1.3 - 2.5 cm)	Orta hız / Orta hacim	Düşük	Sınır yok, karmaşık geometriler	Orta: Reçineye tiksot- ropik özellik (akma direnci) kazandırmak için fume silika kullanı- mı kritiktir.
SMC	Kırpılmış (Rastgele) veya Sürekli	Yüksek hız / Yüksek hacim	Yüksek	Kalıp boyu- tuna bağlı, yüksek bo- yutsal karar- lılık	Yüksek: Kimyasal ka- lınlaşma (olgunlaşma) reaksiyonu nano tozla- rın varlığından doğru- dan etkilendir.
BMC	Çok kısa kır- pılmış (3 - 6 mm)	Çok yüksek hız / Seri üretim	Yüksek	Küçük ve çok karmaşık detaylı par- çalar	Çok Yüksek: Hamur re- olojisi zaten yoğundur; nano toz aglomerasyon riski maksimumdur.
GMT	Sürekli veya uzun cam keçe (Termoplastik)	Çok yük- sek hız (<60 s çevrim)	Çok Yük- sek	Büyük yapı- sal otomotiv parçaları	Kritik: Erimiş termop- lastik vizkozitesi çok yüksektir; nano tozlar kristallenme hızını artırır (Karger-Kocsis, 1994).
RTM	Kuru preform (Sürekli/Do- kuma)	Or- ta-Yüksek hız / Seri üretim	Çok Yük- sek	Kalıp boyu- tuyla sınırlı, çift yüz pü- rürsüz	Kritik (Filtrasyon): Sıkışık elyaflar arasında nano tozların süzülerek takılma riski vardır (Er- dal, Sonmez ve Coulon, 2007).
VARTM	Kuru preform (Sürekli/Do- kuma)	Dü- şük-Orta hız / Büyük parça	Dü- şük-Orta	Çok büyük parçalar (Kanat, gemi gövdesi)	Yüksek: Sadece vakum gücü (ΔP) olduğundan viskozite artışına karşı toleransı çok düşüktür.
Otoklav	Prepreg (Sü- rekli/Yönlen- miş)	Çok dü- şük hız / Özel üretim	Astrono- mik	Büyük, ultra yüksek per- formanslı parçalar	Gelişmiş: Tabakalar arası kırılma tokluğunu (G_{IC} / G_{IIC}) artırmak için grafen/CNT serilmesi- ne çok uygundur.

Üretim Yöntemi	Elyaf Formu / Boyu	Üretim Hızı / Hacmi	Kalıp Maliyeti	Parça Boyut / Geometri Sınırı	Nano Toz / Nanoteknoloji Entegrasyon Hassasiyeti
Pultrüzyon	Sürekli fitil ve keçe	Sürekli ve çok hızlı	Orta-Yüksek	Sabit kesitli, sonsuz boyda profiller	Yüksek: Kalıp içi sürtünme katsayısını ve çekme kuvvetini doğru- dan etkiler.
Filament Sarma	Sürekli fitil	Orta-Yüksek hız	Orta	Eksensel simetrik, silindirik/küresel parça	Orta-Yüksek: Elyaf sarma gerginliği ile reçine banyosu ıslatma dinamikleri dengelenmelidir.

5.1. Polimer Matrisli Kompozitlerde Nanoteknoloji Üzerine Genel Bir Değerlendirme ve Gelecek Projeksiyonu

Bu çalışma boyunca incelenen tüm üretim yöntemleri göstermektedir ki; polimer matrisli kompozit imalatı, makro boyutlu elyafların taşıyıcı gücü ile mikro/nano boyutlu matris modifikasyonlarının mükemmel bir sinerjisi-
dir. Geleneksel PMK imalat süreçleri olgunluğa erişmiş olsa da malzemenin matris kaynaklı zayıflıkları (düşük tabakalar arası kayma mukavemeti, darbe sonrası mikro çatlak ilerlemesi ve delaminasyon) endüstrideki sınırları belirlemeye devam etmektedir.

Nanoteknoloji, özellikle nano tozlar (nanopartiküller) vasıtasıyla polimer zincirleri ile elyaf yüzeyleri arasındaki “arayüzey (interphase)” bölgesini moleküler düzeyde yeniden tasarlama imkânı sunmaktadır (Thostenson, Li ve Chou, 2005). Grafen, karbon nanotüpler (CNT), nano-killer ve fonksiyonel metal oksit nano tozları; kompozit yapılara sadece mekanik mukavemet kazandırmakla kalmayıp, malzemeye “akıllı” (smart) özellikler de atfetmektedir. Örneğin; matrisle homojen dağıtılmış CNT ağları sayesinde yapısal sağlık takibi (structural health monitoring) yapılabilmekte, parça içindeki hasarlar elektriksel direnç değişimi üzerinden tespit edilebilmektedir.

Ancak nanoteknolojinin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel üretime (SMC, RTM, Pultrüzyon vb.) aktarılmasında iki temel mühendislik bariyeri bulunmaktadır:

- **Aglomerasyon (Kümelenme) ve Reoloji Problemi:** Nano tozların yüksek yüzey enerjileri sebebiyle topaklanma eğilimleri, sıvı matrislerin viskozitesini dramatik şekilde artırarak infüzyon, püskürtme veya sarma proseslerini zorlaştırmaktadır.

- **Filtrasyon (Süzülme) Olgusu:** LCM (RTM/VARTM) proseslerinde sıvı reçine kuru elyafar arasından geçerken elyafarın nano tozları süzmesi, kompozitte heterojenliğe yol açmaktadır.

Gelecekte, nano tozların yüzey kimyasının (fonksiyonelleştirme) geliştirilmesi, yeşil/sürdürülebilir nano-katkıların (örneğin endüstriyel atıklardan elde edilen fonksiyonel dolgu tozlarının) sürece dahil edilmesi ve simülasyon destekli reoloji yönetimi sayesinde, nanoteknoloji modifiyeli polimer kompozitler havacılıktan otomotive, rüzgâr enerjisinden biyotıp uygulamalarına kadar yeni nesil mühendislik tasarımlarının öncüsü olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [2] Ajayan, P. M., Schadler, L. S., & Braun, P. V. (2006). *Nanocomposite science and technology*. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons.
- [3] Thostenson, E. T., Li, C., & Chou, T. W. (2005). Nanocomposites in context. *Composites Science and Technology*, 65(3-4), 491-516.
- [4] Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. Materials Park, OH: ASM International.
- [5] Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design* (3. bs.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [6] Advani, S. G., & Sozer, E. M. (2012). *Process modeling in composites manufacturing* (2. bs.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [7] Friedrich, K., Zhang, Z., & Schlarb, A. K. (2005). Effects of various nanoparticles on hardness, wear and morphological properties of polymers. *Composites Science and Technology*, 65(15-16), 2329-2343.
- [8] Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J., & Gun'ko, Y. K. (2006). Small amounts of carbon nanotubes in polymer matrices can photo-stabilize polymers. *Carbon*, 44(9), 1624-1631.
- [9] Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications* (2. bs.). Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.
- [10] Rostami, A., Biros, S. A., & Al-Shammari, M. A. (2014). The effect of nanoparticles on the scratch resistance and mechanical properties of gelcoats. *Journal of Coatings Technology and Research*, 11(2), 245-253.
- [11] Yasmin, A., & Daniel, I. M. (2004). Mechanical properties of graphite platelet/epoxy nanocomposites. *Polymer*, 45(24), 8211-8219.
- [12] Morgan, A. B., & Wilkie, C. A. (Eds.). (2007). *Flame retardant polymer nanocomposites*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [13] Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B., & Schulte, K. (2006). Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2697-2704.
- [14] Kia, H. G. (1993). *Sheet moulding compounds: science and technology*. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.
- [15] Jutte, R. B. (1983). Structural SMC: Material, process, and part design. *SAE Transactions*, 92, 218-228.
- [16] Gojny, F. H., & Schulte, K. (2004). Functionalisation of carbon nanotubes in conformity with epoxy matrices. *Composites Science and Technology*, 64(15), 2303-2308.

- [17] Marker, L. F., & Ford, B. (1977). Rheology and thickening kinetics of SMC. *SPI 32nd Annual Technical Conference* içinde (Bölüm 16-B). Washington, DC.
- [18] Thostenson, E. T., & Chou, T. W. (2006). Processing-structure-property relationships of carbon nanotube-reinforced composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(19), 4273-4282.
- [19] Han, Z., & Fina, A. (2011). Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. *Progress in Polymer Science*, 36(7), 914-944.
- [20] Meyer, R. W. (1987). *Handbook of polyester molding compounds and molding technology*. London, UK: Chapman and Hall.
- [21] Wetzel, B., Hauptert, F., & Zhang, M. Q. (2006). Development of hard-particle reinforced epoxy resin nanocomposites. *Wear*, 260(1-2), 136-143.
- [22] Hussain, M., Nakahira, A., & Niihara, K. (2006). Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composites filled with nano-clay particles. *Polymer Composites*, 27(6), 690-698.
- [23] Rudd, C. D. (1997). *Liquid moulding technologies: resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processes*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- [24] Diallo, A. K., Morgan, A. B., & Wilkie, C. A. (2015). Nanoparticle filtration effects during liquid composite molding: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 308-322.
- [25] Karger-Kocsis, J. (Ed.). (1997). *Glass Mat Thermoplastics (GMT): Production and Technologies*. London, UK: Chapman & Hall.
- [26] Louie, M., Kolarik, R., & Advani, S. G. (1995). Compression molding of glass mat thermoplastics: process modeling and experimentation. *Polymer Composites*, 16(3), 199-211.
- [27] Sinha Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, 28(11), 1539-1641.
- [28] Advani, S. G. (Ed.). (2007). *Processing and properties of nanocomposites*. Singapore: World Scientific.
- [29] Parnas, R. S. (2000). *Liquid composite molding*. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.
- [30] Rudd, C. D., Long, A. C., Kendall, K. N., & Mangin, C. G. E. (1997). *Liquid moulding technologies*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- [31] Erdal, M., Sonmez, F. O., & Coulon, E. (2007). Effect of particle filtration on the preparation of nanoparticle-loaded fiber-reinforced composites by RTM. *Journal of Composite Materials*, 41(20), 2469-2495.
- [32] Kim, M., Park, Y. B., Okoli, O. I., & Zhang, C. (2009). Processing and mechanical properties of carbon nanotube/epoxy composites using RTM. *Composites Part*

A: Applied Science and Manufacturing, 40(4), 424-431.

- [33] Seemann, K. J. (1990). *Plastic transfer molding apparatus for the production of fiber reinforced plastic structures* (U.S. Patent No. 4,902,215). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [34] Fan, Z., Santare, M. H., & Advani, S. G. (2008). VARTM processing and mechanical properties of CNT/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 68(15-16), 3340-3347.
- [35] Zhou, Y., Jeelani, S., & Lacy, T. E. (2013). Experimental study on the low-velocity impact response of nano-silica modified epoxy/carbon fiber composites manufactured by VARTM. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1085-1094.
- [36] Campbell, F. C. (2004). *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford, UK: Elsevier.
- [37] Sihn, S., Kim, R. Y., Kawabe, K., & Tsai, S. W. (2008). Enhancement of interlaminar properties of carbon fiber composites using carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 68(3-4), 658-665.
- [38] Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z., & Koratkar, N. (2009). Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*, 5(22), 2556-2561.
- [39] Starr, T. (2000). *Pultrusion: Moulders' Sprague Guide*. Oxford, UK: Elsevier.
- [40] Roux, M., Eguiazabal, J. I., & Nazabal, J. (2016). Effect of nanoparticle addition on the pultrusion processing of epoxy/glass fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 50(12), 1645-1657.
- [41] Vedernikov, A., Safonov, A., Tucci, F., Carlone, P., & Akhatov, I. (2020). Effects of resin matrix modifiers on the mechanical performance of pultruded profiles. *Composite Structures*, 242, 112173.
- [42] Peters, S. T. (2013). *Handbook of composites* (2. bs.). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media.
- [43] Cohen, D. (1997). Influence of filament winding parameters on composite vessel quality. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(12), 1035-1047.
- [44] Sun, L., Boo, W. J., Browning, R. L., Sue, H. J., & Clearfield, A. (2009). Carbon nanotube enhances the gas barrier properties of polymer nanocomposites. *Polymer*, 50(7), 1733-1740.
- [45] Gibson, A. G. (1994). The pultrusion and centrifugal casting of composites. *Comprehensive Composite Materials* içinde (ss. 1-25). Oxford, UK: Woodhead Publishing.
- [46] Lajvardi, S. M., Sharifshahraki, M., & Shokrieh, M. M. (2015). Centrifugal casting of functionally graded polymer nanocomposites: Particle segregation modeling. *Composites Part B: Engineering*, 79, 415-422.
- [47] Karger-Kocsis, J. (Ed.). (2012). *Polypropylene: structure, blends and composites*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media.

- [48] Joshi, S. C., & Bhudolia, S. K. (2014). Binder effects on particle filtration during resin transfer molding of nano-modifier embedded composites. *Journal of Composite Materials*, 48(25), 3121-3135.
- [49] Sham, M. L., & Kim, J. K. (2006). Surface functionalities of multi-wall carbon nanotubes after UV/ozone and phosphoric acid treatments. *Carbon*, 44(4), 768-777.
- [50] Macosko, C. W. (1989). *RIM: Reaction Injection Molding*. New York, NY: Carl Hanser Verlag.
- [51] Becker, W. E. (Ed.). (2012). *Reaction injection molding*. New York, NY: Springer Science & Business Media.
- [52] Karger-Kocsis, J. (1994). Microstructural aspects of polymer nanocomposites formed via reaction injection molding. *Journal of Materials Science*, 29(20), 5407-5415.
- [53] Yuan, Q., & Misra, R. D. K. (2006). Impact fracture behavior of clay-reinforced polyurethane nanocomposites prepared by reaction injection molding. *Polymer*, 47(12), 4421-4433.